



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO**

### **“DETERMINACIÓN DE PERDIDAS ENERGÉTICAS QUE SE PRODUCEN EN MOTORES TRIFÁSICOS ASINCRÓNICOS TIPO JAULA DE ARDILLA (MAJA3F) POR LA EVOLUCIÓN DE MODOS DE FALLO MEDIANTE TERMOGRAFÍA”**

**CHACHA BAUTISTA DARWIN GUILLERMO**

## **TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Para la obtención del Título de:**

**INGENIERO DE MANTENIMIENTO**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2016**

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

**2016-12-20**

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

**CHACHA BAUTISTA DARWIN GUILLERMO**

Titulada:

**“DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS ENERGÉTICAS QUE SE  
PRODUCEN EN MOTORES TRIFÁSICOS ASINCRÓNICOS TIPO JAULA DE  
ARDILLA (MAJA3F) POR EVOLUCIÓN DE MODOS DE FALLO MEDIANTE  
TERMOGRAFÍA”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO DE MANTENIMIENTO**

---

Ing. Carlos Santillán Mariño  
**DECANO FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Pablo Fiallos Velasco  
**DIRECTOR**

---

Ing. Eduardo Hernández Dávila  
**ASESOR**

---

## **CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** CHACHA BAUTISTA DARWIN GUILLERMO

**TÍTULO DE LA TESIS:** **“DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS ENERGÉTICAS QUE SE PRODUCEN EN MOTORES TRIFÁSICOS ASINCRÓNICOS TIPO JAULA DE ARDILLA (MAJA3F) POR EVOLUCIÓN DE MODOS DE FALLO MEDIANTE TERMOGRAFÍA”**

**Fecha de Examinación:** 2016-12-20

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

<b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>	<b>APRUEBA</b>	<b>NO APRUEBA</b>	<b>FIRMA</b>
Ing. Marco Santillán Gallegos <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Pablo Fiallos Velasco <b>DIRECTOR</b>			
Ing. Eduardo Hernández Dávila <b>ASESOR</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. Marco Santillán Gallegos  
**PRESIDENTE TRIB. DEFENSA**

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El trabajo de grado que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

**Chacha Bautista Darwin Guillermo**

## **DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD**

Yo, Darwin Guillermo Chacha Bautista, declaro que el presente trabajo de tesis es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

---

**Chacha Bautista Darwin Guillermo**

Cedula de Identidad: 050267568-9

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo dedico a Dios por haberme dado la oportunidad de encontrar el camino del bien y permitir el alcance de algo tan importante en mi vida, a mi madre por darme ese apoyo incondicional y evitar que desmaye los ánimos para el alcance de esta meta.

A todas las personas que de una u otra manera colaboraron desinteresadamente con un granito de arena para cumplir la meta que la estoy haciendo realidad.

**Chacha Bautista Darwin Guillermo**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por ser la inspiración de la vida y permitir llegar a cumplir un objetivo más a mi madre por ser un apoyo y a pesar de las adversidades apoyarme en las buenas y malas.

A los ingenieros de la escuela de ingeniería de mantenimiento, personas que con los conocimientos sólidos me brindaron su ayuda desinteresada en el desarrollo de este proyecto.

A la escuela superior politécnica de Chimborazo, en especial a la escuela de ingeniería de mantenimiento, por darnos la oportunidad de obtener una profesión, y ser útiles a la sociedad y a la país.

**Chacha Bautista Darwin Guillermo**

## INDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	
1.1	Antecedentes .....	1
1.2	Justificación .....	1
1.3	Objetivos.....	2
1.3.1	<i>Objetivo general</i> .....	2
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i> .....	2
<b>2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	
2.1	Motores eléctricos.....	3
2.2	Motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla.....	3
2.2.1	<i>Elementos constitutivos del motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla..</i>	4
2.2.1.1	Carcasa.....	4
2.2.1.2	<i>Estator</i> .....	5
2.2.1.3	<i>Rotor</i> .....	5
2.3	<i>Zonas eléctricas de fallas en motores eléctricos</i> .....	7
2.3.1	<i>Calidad de alimentación</i> .....	7
2.3.1.1	<i>Calidad de potencia</i> .....	7
2.3.1.2	<i>Desequilibrio de voltaje fase a fase</i> .....	8
2.3.1.3	<i>Voltaje terminal</i> .....	9
2.3.1.4	<i>Armónicos</i> .....	10
2.3.2	<i>Circuito de potencia</i> .....	12
2.3.3	<i>Aislamiento</i> .....	14
2.3.4	<i>Estator</i> .....	15
2.3.5	<i>Rotor:</i> .....	16
2.3.6	<i>Entrehierro:</i> .....	16
2.4	Principales fallas en motores trifásicos asíncronos tipo jaula de ardilla.....	17
2.4.1	<i>Fallas mecánicas.</i> .....	17
2.4.1.1	<i>Desbalance mecánico</i> .....	17
2.4.1.1.1	<i>Tipos de desbalances</i> .....	17
2.4.1.1.2	<i>Causas de desbalance</i> .....	19
2.4.1.2	<i>Falla en los rodamientos</i> .....	19
2.4.1.2.1	<i>Causas de fallas en rodamientos</i> .....	19
2.4.1.3	<i>Excentricidad</i> .....	20
2.4.1.3.1	<i>Tipos de excentricidades</i> .....	20
2.4.2	<i>Fallas eléctricas</i> .....	20
2.4.2.1	<i>Fallas en la simetría de los bobinados del estator</i> .....	20
2.4.2.2	<i>Fallas en la simetría de los bobinados del rotor</i> .....	20
2.4.2.3	<i>Ranuras del estator y ranuras del rotor</i> .....	20
2.4.2.4	<i>Bobinado del rotor</i> .....	20
2.4.2.5	<i>Paquetes de bobinas del estator</i> .....	21
2.4.3	<i>Fallas de enlace por potencia.</i> .....	24
2.4.3.1	<i>Desalineación en acoples de ejes</i> .....	24
2.4.3.1.1	<i>Causas de desalineación</i> .....	24
2.4.3.1.2	<i>Tipos de desalineación</i> .....	24
2.4.3.2	<i>Fallas en engranajes</i> .....	25
2.4.3.3	<i>Transmisión de potencia en poleas</i> .....	26
2.5	Eficiencia energética.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b> 24



2.5.1	<i>Analizador energético</i> .....	26
2.5.1.1	<i>Características del analizador energético marca Fluke 435-II</i> .....	27
2.6	<i>Termografía</i> .....	28
2.6.1	<i>Física térmica para el mantenimiento predictivo</i> .....	29
2.6.1.1	<i>Conductividad térmica</i> .....	29
2.6.1.2	<i>Emisividad</i> .....	29
2.6.1.3	<i>Reflexión</i> .....	29
2.6.1.4	<i>Condiciones meteorológicas</i> .....	29
2.6.1.5	<i>Sistemas de calefacción y ventilación</i> .....	29
2.6.2	<i>Cámaras termográficas</i> .....	30
2.6.2.1	<i>Requisitos esenciales para un correcto análisis termográfico</i> .....	30
2.6.3	<i>Criterios de análisis termográfico para sistemas eléctricos</i> .....	31
<b>3.</b>	<b>CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE PRUEBAS</b>	
3.1	<i>Alcance y objetivos del módulo de pruebas</i> .....	32
3.1.1	<i>Definición del alcance del módulo de pruebas</i> .....	32
3.1.2	<i>Objetivos de la construcción del módulo de pruebas</i> .....	32
3.2	<i>Características requeridas del módulo de pruebas</i> .....	33
3.3	<i>Construcción del módulo de pruebas</i> .....	33
3.3.1	<i>Sistema mecánico</i> .....	34
3.3.2	<i>Sistema eléctrico</i> .....	35
3.3.3	<i>Sistema hidráulico</i> .....	37
3.4	<i>Descripción de componentes del módulo de pruebas</i> .....	40
3.4.1	<i>Tubo hierro cuadrado</i> .....	41
3.4.2	<i>Descripción del motor eléctrico trifásico tipo jaula de ardilla</i> .....	41
3.4.3	<i>Tablero de control eléctrico</i> .....	42
3.4.4	<i>Descripción del interruptor eléctrico</i> .....	42
3.4.5	<i>Descripción del contactor</i> .....	43
3.4.6	<i>Descripción del relé térmico</i> .....	43
3.4.8	<i>Cable flexible</i> .....	44
3.4.9	<i>Conector macho</i> .....	44
3.4.10	<i>Focos</i> .....	45
3.4.11	<i>Bomba centrífuga</i> .....	45
3.4.12	<i>Tubería</i> .....	46
3.4.13	<i>Válvula tipo compuerta</i> .....	46
3.4.14	<i>Acople tipo araña</i> .....	46
3.4.15	<i>Universal</i> .....	47
3.4.16	<i>Acople para tanque</i> .....	47
3.4.17	<i>Codos</i> .....	47
3.4.18	<i>Reducción campana</i> .....	48
3.4.19	<i>Manómetro de presión de agua</i> .....	48
3.4.20	<i>Acople tipo T</i> .....	48
3.4.21	<i>Recipiente plástico</i> .....	49
3.5	<i>Construcción del módulo de pruebas</i> .....	49
3.5.1	<i>Procedimiento de la construcción del módulo de pruebas</i> .....	49
3.6	<i>Pruebas de operación</i> .....	53
3.6.1	<i>Prueba de operación del módulo de pruebas</i> .....	53
<b>4.</b>	<b>MEDICIONES</b>	
4.1	<i>Análisis de la aparición de los modos de fallos en el motor eléctrico</i> .....	54

4.1.1	<i>Creación del modo de fallo en paralelo</i> .....	54
4.1.2	<i>Mantenimiento del módulo de pruebas</i> .....	54
4.2	Toma y tabulación de datos de la desalineación en paralelo del motor trifásico jaula de ardilla.....	55
4.3	Análisis del incremento de temperatura en función al tiempo de la evolución del modo de fallo desalineación en paralelo. ....	56
4.4	Modelo matemático para el análisis de la pérdida energética que se manifiesta en forma de calor. ....	57
4.5	Regresión para el modelo cuadrático .....	59
4.6	Modelo matemático para el análisis del consumo de energía por la evolución de la desalineación en paralelo. ....	61
4.7	Tabulación de datos del desequilibrio de fases del motor trifásico jaula de ardilla .....	63
4.8	Análisis del incremento de temperatura en función al tiempo de la evolución del modo de fallo del desequilibrio de fases 400W, y 800W. ....	64
4.9	Modelo matemático en función a la temperatura para el análisis de la pérdida energética que se manifiesta en forma de calor a medida que el modo de fallo desequilibrio de Fases evoluciona. ....	65
4.10	Modelo matemático en función al consumo de energía para el análisis de la pérdida energética que se manifiesta en forma de calor a medida que el modo de fallo desequilibrio de Fases evoluciona. ....	65
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS DE PÉRDIDAS ENERGÉTICAS</b>	
5.1	Análisis de pérdidas energéticas de resultados del modo de fallo desalineación en paralelo.....	68
5.1.1	<i>Regresión ecuación del consumo energético vs incremento de la temperatura</i> .....	74
5.2	Análisis de las pérdidas energéticas de los resultados del desequilibrio de fases. ....	77
5.2.1	<i>Incremento de temperatura del motor con desequilibrio de fases</i> .....	79
5.2.2	<i>Relación con sistema Termodinámico</i> .....	80
5.2.3	<i>El costo de la energía</i> .....	81
5.2.4	<i>Regresión modelo potencial</i> .....	83
5.3	Conclusión del análisis de pérdidas energéticas de resultados obtenidos de desalineación en paralelo, desequilibrio de fases del motor 3F tipo jaula de ardilla. ....	85
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
6.1	Conclusiones .....	87
6.2	Recomendaciones .....	87

## BIBLIOGRAFÍA

## ANEXOS

## LISTA DE TABLAS

**Pág.**

1. Características de entrada de tensión y corriente del analizador energético.....	27
2. Criterios de severidad de un problema eléctrico.....	31
3. Listado de componentes del módulo de pruebas .....	40
4. Características del tubo hierro cuadrado.....	41
5. Características del motor eléctrico trifásico tipo jaula de ardilla.....	42
6. Características del tablero de control eléctrico .....	42
7. Características del interruptor eléctrico .....	42
8. Características del contactor .....	43
9. Características del relé térmico.....	43
10. Características del cable eléctrico .....	44
11. Características del cable flexible .....	44
12. Características del conector macho.....	44
13. Características del foco .....	45
14. Características de la bomba centrífuga .....	45
15. Características de la tubería .....	46
16. Características de la válvula tipo compuerta .....	46
17. Características del acople tipo araña.....	46
18. Características del universal .....	47
19. Características del acople para tanque .....	47
20. Características de los codos .....	47
21. Características de la reducción campana .....	48
22. Características del manómetro de presión del agua.....	48
23. Características del acople tipo T.....	48
24. Características del recipiente plástico.....	49
25. Banco de tareas de mantenimiento del módulo de pruebas .....	55
26. Datos del incremento de tem. de la desalineación en paralelo del MTJA .....	58
27. Regresión cuadrática del incremento de temperatura-desalineación .....	60
28. Determinación de los valores.....	60
29. Resolución de la matriz inversa .....	60
30. Datos del incremento del consumo energético de la evolución del modo de fallo de desalineación en paralelo en el MTJA. ....	62
31. Incremento del consumo energético con desequilibrio de fases.....	66
32. La evolución del modo de fallo relacionado con el incremento de temperatura. .....	70
33. Incremento de temperatura vs el incremento de potencia.....	71
34. Costo de la energía perdida cuando existe un incremento de temperatura. ....	72
35. Regresión modelo exponencial método de mínimos cuadrados .....	74
36. Determinación de los valores.....	75
37. Cálculo del costo de la energía perdida. ....	75
38. Incremento del consumo energético relacionado con el incremento de temperatura modo de fallo desequilibrio de fases.....	78

39. Regresión modelo logarítmico .....	79
40. Determinación de valores .....	79
41. Costo de la energía pérdida cuando existe un incremento de temperatura evolución del modo de fallo desequilibrio de fases. ....	81
42. Regresión modelo potencial Datos .....	83
43. Regresión modelo potencial.....	84
44. Cálculo del costo de la energía perdida modo de fallo desequilibrio de fases. ..	84

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1. Motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla .....	3
2. Elementos constitutivos del motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla .....	4
3. Estator del motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla .....	5
4. Rotor del motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla .....	6
5. Curvas características de rendimiento de diferentes diseños de motores .....	7
6. Niveles de degradación basados en el porcentaje de desequilibrio de voltaje.....	8
7. Carga lineal en un motor.....	10
8. Carga no lineal en un variador de frecuencia.....	11
9. Curva de degradación HVF .....	12
10. Evaluación del circuito del motor .....	15
11. Desbalance estático.....	17
12. Desbalance en dos planos o tipo par .....	18
13. Desbalance por rotor colgante .....	19
14. Operación entre dos fases .....	21
15. Corto circuito entre fases .....	22
16. Cortocircuito entre espiras .....	22
17. Falla por sobrecarga.....	23
18. Fallas por picos de voltaje .....	23
19. Desalineación angular.....	24
20. Desalineación paralela .....	25
21. Desalineación por cojinete inclinado con respecto al eje .....	25
22. Analizador energético .....	27
23. Cámara termográfica.....	30
24. Alcance del módulo de pruebas .....	32
25. Sistema mecánico del módulo de pruebas .....	34
26. Circuito de mando y potencia del módulo de pruebas.....	35
27. Componentes y dimensiones de la bomba centrífuga.....	37
28. Curva de rendimiento de la bomba centrífuga.....	40
29. Estructura metálica .....	49
30. Montaje y conexión eléctrica en el tablero eléctrico .....	50
31. Montaje del tablero eléctrico .....	51
32. Montaje del motor sobre la estructura metálica.....	51
33. Montaje y conexión de la bomba con el motor.....	52
34. Conexión de la bomba con el recipiente .....	52
35. Conexión del sistema de succión y descarga del módulo de pruebas.....	52
36. Incremento de temperatura en función a del tiempo.....	56
37. Incremento de temperatura con desalineación en paralelo .....	58
38. Incremento de temperatura con desalineación en paralelo en el motor trifásico jaula de ardilla.....	63

39. Incremento de temperatura modo de fallo desequilibrio de fases en el motor trifásico jaula de ardilla.....	64
40. Desequilibrio energético con desequilibrio de fases.....	67
41. Incremento de temperatura de la desalineación en paralelo .....	68
42. Análisis del incremento de potencia del motor, relación incremento de temperatura desalienación en paralelo .....	71
43. Incremento del consumo energético relacionado con el incremento de temperatura. ....	73
44. Costo de la Energía pérdida en función del tiempo .....	76
45. Incremento de temperatura del desequilibrio de fases.....	77
46. Análisis del incremento de temperatura del motor con desequilibrio de fases..	78
47. Análisis del incremento del consumo de potencia del motor con desequilibrio de fases con relación al incremento de temperatura .....	82
48. Costo de la energía perdida cuando existe un incremento de temperatura modo de fallo desequilibrio de fases.....	83
59. Costo de la energía perdida cuando existe un incremento de temperatura modo de fallo desequilibrio de fases.....	85

## LISTA DE ABREVIACIONES

<b>MAJA</b>	Motor Asincrónico Jaula de Ardilla
<b>3F</b>	Trifásico.
<b>NEMA</b>	Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos.
<b>NETA</b>	Asociación de pruebas eléctricas internacional.
<b>IEEE</b>	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
<b>EASA</b>	Asociación de Servicios de Aparatos Eléctricos.
<b>MCE</b>	Evaluación del circuito del motor.
<b>RIC</b>	Chequeo Influencia de Rotor.
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto.
<b>MIL-STD-2194(SH)</b>	Normas Establecidas para fuerzas militares de los EE UU
<b>V</b>	Tensión eléctrica
<b>W.h</b>	Vatio hora.
<b>T</b>	Temperatura.
<b>°C</b>	Grados centígrados.

## **LISTA DE ANEXOS**

- A** AMEF en motores eléctricos
- B** Tabulación de datos desalineación en paralelo
- C** Tabulación de datos evolución del modo de fallo desequilibrio energético
- D** Características de los conductores eléctricos
- E** Cálculo de la caída de tensión
- F** Cálculo De  $\cos\phi$
- G** Reporte termográfico sin desalineación en paralelo del motor trifásico tipo jaula de ardilla
- H** Reporte termográfico con 0,25 mm de desalineación en paralelo del motor trifásico tipo jaula de ardilla
- I** Reporte termográfico con 0,5 mm de desalineación en paralelo del motor trifásico tipo jaula de ardilla
- J** Reporte termográfico con 0,75 mm de desalineación en paralelo del motor trifásico tipo jaula de ardilla
- K** Reporte termográfico con 0,1 mm de desalineación en paralelo del motor trifásico tipo jaula de ardilla
- L** Reporte termográfico sin desequilibrio de fases del motor trifásico tipo jaula de ardilla
- M** Reporte termográfico con 800w de desequilibrio energético en una de las fases del motor trifásico tipo jaula de ardilla



## **RESUMEN**

La investigación realizada tiene como objetivo crear dos modos de fallo, el estudio y análisis de los comportamientos de la evolución de los modos de fallo en el motor eléctrico trifásico asincrónico tipo jaula de ardilla MAJA3F mediante el uso de la técnica de termografía, la evolución de los modos de fallo se presenta en un módulo que se construyó con la finalidad de realizar el análisis del fallo a diferentes periodos de tiempo manteniendo la carga de trabajo del motor. Se realizó la toma de los termogramas utilizando una cámara termográfica para el análisis de los incrementos de temperatura en función los parámetros que se establecieron para los dos modos de fallo que se implementaron, con el analizador de la calidad de energía FLUKE 435 serie II se midió los valores de voltaje e intensidad que se presentaron a medida que el modo de fallo evoluciona, los periodos de medición para la evolución del modo de fallo se fue incrementando en 0.25mm hasta 1mm de desalienación, los termogramas se realizaron cada 30 minutos. Para la evolución del modo de fallo de desequilibrio energético se desequilibró con 400w, 800w, los periodos de medición se realizaron cada 15 minutos. Se realizó un modelo comparativo utilizando los datos obtenidos del análisis de los modos de fallo considerando las pérdidas energéticas en forma de calor y los costos que estas representan detectando así la energía que no es aprovechada por el consumidor.

## **ABSTRACT**

Analazing the energetic losses that produce in the three-phase squirrel cage asynchronous motors (MAJA3F) by the evolution of failure mode with the purpose of quantify the losses that produce in the failed that reflect in the gradual variation through a predictive diagnostic technique known as thermography. It started with the digital modeling of the module simulator of failure through the computer tool: solid work, determining elements and components that allowed the construction of the module, which generated the simulation of failures of misalignment in parallel and energy imbalance in a transmission system of power pump motor. For the evolution of the failure mode of misalignment in parallel increased of 0.25 mm to 1 mm of displacement in parallel the engine with the pump, the intervals of time established after the analysis of the operational parameter of temperature of the engine was of 30 minutes. The failure mode of energetic imbalance was done applying 400W and 800W of imbalance in two phases, the thermograms were taken in periods of 15 minutes. The values of voltage and intensity that were presented as the failure mode was developing of progressive way; they were measured with the power quality analyzer FLUKE 435 series II. The temperature increase in the evolution of the failure modes allowed to identify the severity of the failure modes. The analysis made in function to the temperature in the system allowed to quantify the energy loss that produce as failures developed.

**KEY WORDS:** <FAILURE MODE> < THERMOGRAPF1Y ANALYSIS> < THREE-PHASE SQUIRREL CAGE ASYNCHRONOUS MOTORS (MAJA3F)> < PREDICTIVE DIAGNOSTIC < MISALIGNMENT IN PARALLEL> < ENERGETIC IMBALANCE> < OPERATIONAL PARAMETERS < TEMPERATURE INCREASED

# **CAPÍTULO I**

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Antecedentes**

El surgimiento del mantenimiento predictivo a partir de los ochenta, ha permitido que el mantenimiento industrial hoy en día ayude a garantizar la disponibilidad y eficacia requerida de los equipos e instalaciones, minimizando costes de mantenimiento en la industria, mediante un conjunto de técnicas como análisis termográfico.

El análisis termográfico es una herramienta de diagnóstico muy potente y rápida al momento de detectar anomalías que suelen ser invisibles a simple vista, permitiendo tomar acciones preventivas antes que se produzca costosas fallas, mediante el uso de las cámaras termográficas, cuyos instrumentos permiten determinar cuando y donde necesita mantenimiento, puesto que en las instalaciones y estructura de los motores eléctricos suelen calentarse antes de fallar, los mismos que se manifiestan por el desarrollo de los modos de fallos como desequilibrio de tensiones, inadecuada lubricación, desalineación, sobrecarga entre otros. (FLIR, 2011)

Para diagnosticar con certeza la falla de un motor, es necesario combinar con otra herramienta como el análisis de eficiencia energética para contribuir a identificar con mayor precisión áreas de los equipos donde las industrias pueden reducir costes de consumo de energía.

### **1.2 Justificación**

El mantenimiento predictivo garantiza la mejor gestión de los recursos, tratando de predecir el estado de una máquina, relacionándolo con una variable física de fácil medición como temperatura, presión, composición de un lubricante, entre otros. Donde las tolerancias en la termografía de los motores eléctricos disminuyen los posibles daños que puedan presentarse en la parte eléctrica, estática y dinámica del motor. En el presente trabajo de titulación se planteó determinar las pérdidas energéticas durante la evolución

de fallas en un módulo de pruebas para los motores trifásicos asincrónicos tipo jaula de ardilla (MAJA3F), donde se propuso el desarrollo de un modelo matemático, mediante la medición de una variable física de temperatura en relación a la evolución de los modos de fallo. El modelo matemático desarrollado y el equipo empleado para apoyar en la labor de diagnóstico de fallas en motores trifásicos asincrónicos tipo jaula de ardilla (MAJA3F), se realizó en dos modos de fallas tanto en desalineación como en el desequilibrio de tensiones, evidenciándose cambios de temperatura mediante la variación del tiempo, en el cual se realizó una evaluación energética que facilitó cuantificar el consumo.

Este proyecto enmarcado en las áreas y líneas de investigación de la ESPOCH 2012-2017, del área V de la investigación científica, vinculando la educación superior con el sector productivo del Ecuador, (SECRETARÍA GENERAL ESPOCH, 2012)

### **1.3       Objetivos**

#### **1.3.1       *Objetivo general.***

Determinar las pérdidas energéticas que se producen en los motores trifásicos asincrónicos tipo jaula de ardilla (MAJA3F) por la evolución de modos de fallo mediante termografía.

#### **1.3.2       *Objetivos específicos.***

Investigar el marco teórico referencial adecuado para el desarrollo del proyecto.

Construir el módulo de pruebas para simulación de fallas en el (MAJA 3F)

Analizar los modos de fallo en motores eléctricos.

Realizar las mediciones necesarias para la evaluación energética.

Crear un modelo matemático con los resultados obtenidos de las mediciones para el análisis de la pérdida energética

## **CAPÍTULO II**

### **2. MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Motores eléctricos**

Los motores eléctricos son máquinas eléctricas, en donde las espiras rotativas del conductor son guiadas mediante la fuerza magnética ejercida por el campo magnético y la corriente eléctrica, transformándose la energía eléctrica en mecánica. (JIMENEZ, 2011)

Existen diversos tipos de motores dependiendo de su construcción, pero esta investigación se basó en el motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla.

#### **2.2 Motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla**

El motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla de la figura 1, convierte la energía eléctrica en energía mecánica rotacional, donde el devanado del estator se alimenta con corriente alterna trifásica desde la red y por inducción en el rotor. (MEJÍA, 2009)

Figura 1. Motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla



Fuente: (MEJÍA, 2009)

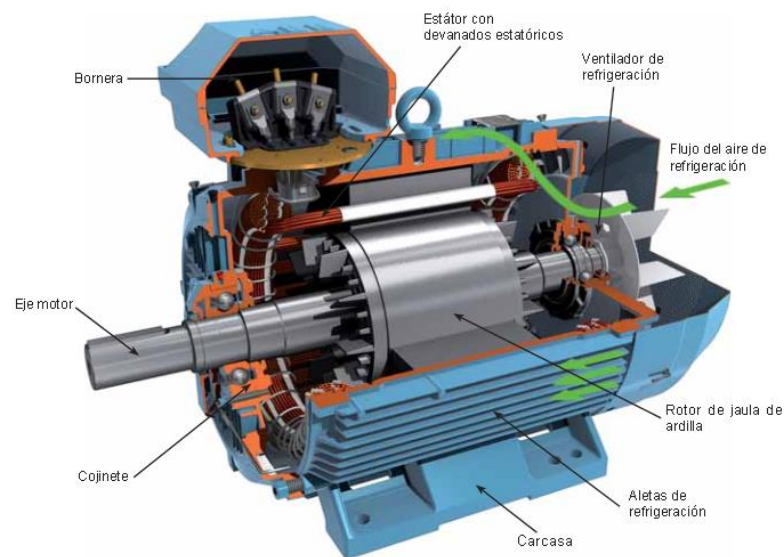
Los motores trifásicos asíncronos tipo jaula de ardilla se caracterizan por la forma de su rotor y por generar tensiones trifásicas mediante un alternador con tres devanados iguales. Pero desfasados  $120^\circ$  en el espacio, estos devanados se encuentran en la parte no giratoria

llamada estator. (CIFP, 2013).

### 2.2.1 Elementos constitutivos del motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla.

Los principales componentes del motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla son: la carcasa, el estator, el rotor, eje del motor, ventilador, bornera, aletas de refrigeración, cojinete los mismos que se identifican en la figura 2.

Figura 2. Elementos constitutivos del motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla



Fuente: (MEJÍA, 2009)

Entre los principales componentes del motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla se describen los siguientes:

**2.2.1.1 Carcasa.** La carcasa casi siempre está hecha de hierro colado siendo su principal función:

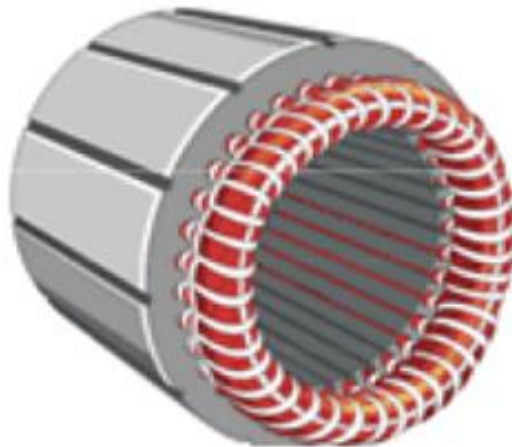
- Disipar el calor, por las pérdidas en el motor.
- Fijar y sujetar las chapas del estator.
- Sostener las tapas donde se localiza los cojinetes y otros elementos auxiliares.
- Evitar el contacto con los demás elementos del motor.

**2.2.1.2 Estator.** Este componente del motor está conformado por un conjunto de chapas ferromagnéticas, para evitar pérdidas por corrientes parásitas, como se muestra en la figura 3.

El estator aloja entre sus ranuras los conductores de los bobinados, los mismos que producen el campo magnético y se encuentran separados por cierto ángulo mecánico, dependiendo del número de par de polos del estator, donde un par de polos es un conjunto de tres bobinas, cada uno conectado a una fase del sistema trifásico de corrientes, desfasado  $120^\circ$  eléctricos uno de otro.

Donde los devanados estatóricos trifásicos pueden conectarse en estrella o en triángulo dependiendo los parámetros de trabajo que requiera.

Figura 3. Estator del motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla



Fuente: (MEJÍA, 2009)

**2.2.1.3 Rotor.** Esta es la parte móvil del motor, como se observa la figura 4, donde el bobinado consiste en un conjunto de barras conductoras que se alojan en la periferia del motor.

El bobinado del rotor se encuentra cortocircuitado a través de unas barras conductoras, estas no permite que se realicen modificaciones en el rotor. (MEJÍA, 2009)

Es un cilindro montado en un eje en su interior contiene barras conductoras longitudinales que están conectadas en sus extremos en cortocircuito los anillos que conforman la jaula

Figura 4. Rotor del motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla



Fuente: (MEJÍA, 2009)

Según La Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA, 2012) se ha desarrollado un sistema de identificación con letras, donde los motores con potencia mayor a 1HP con rotor tipo jaula de ardilla se clasifican de la siguiente manera:

Clase A: Este motor clase A tiene un par y corriente de arranque normal, bajo deslizamiento y la resistencia del rotor es baja.

Clase B: Este motor tiene un par de arranque normal y corriente de arranque, bajo deslizamiento y tiene aproximadamente el mismo par de arranque que el de clase A.

Clase C: Este motor clase C, tiene una resistencia eléctrica mayor al de la clase B y es de doble jaula, con un par de arranque mayor al de la clase A y B e intensidad de arranque baja.

Clase D: Este motor tiene un par de arranque elevado, tiene mucho deslizamiento y resistencia eléctrica grande. (MEJÍA, 2009)

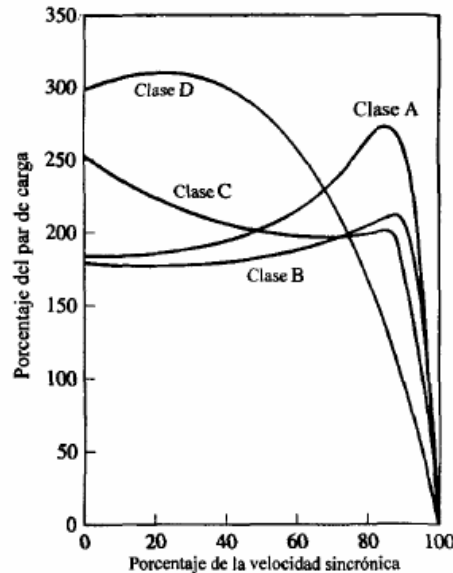
En la figura 5 se observa las curvas características de los diferentes tipos de motores, clase A, B, C, D donde el eje de las abscisas representa el porcentaje de la velocidad síncrona



del motor trifásico tipo Jaula de Ardila y el eje de las ordenadas el porcentaje del par de carga.

Las curvas describen el rendimiento de cada motor según su rendimiento. (NEMA, 2012)

Figura 5. Curvas características de rendimiento de diferentes diseños de motores



Fuente: NEMA, 2012

## 2.3 Zonas eléctricas de fallas en motores eléctricos

Entre las zonas eléctricas de fallas en motores eléctricos trifásicos más importantes a considerar son seis.

**2.3.1 Calidad de alimentación.** La calidad de alimentación se refiere a la condición de la señal de voltaje y corriente, es decir es una de las fallas más preocupante por la penalidad del factor de potencia y los costos energéticos que han aumentado los variadores de frecuencia y otras cargas. Dentro de los mecanismos que pueden desmejorar la calidad de alimentación se encuentran incluidas las cargas monofásicas y trifásicas no lineales, variadores de frecuencia, equipos de arranque y frenado, picos de voltaje entre otros. (BETHEL, 2015)

**2.3.1.1 Calidad de potencia.** La calidad de potencia evalúa la condición de la señal de voltaje suministrado al circuito del motor.

Prueba del análisis de potencia del analizador energético FLUKE 435-II permite tomar fotos de la calidad de potencia para ver que señala la condición de voltaje y evaluar que efecto tendría sobre el motor.

Siendo el tiempo real de la muestra de 10 minutos, enfocados en los voltajes de fase a fase del motor y que efectos tienen ellos sobre su funcionamiento. (BETHEL, 2015)

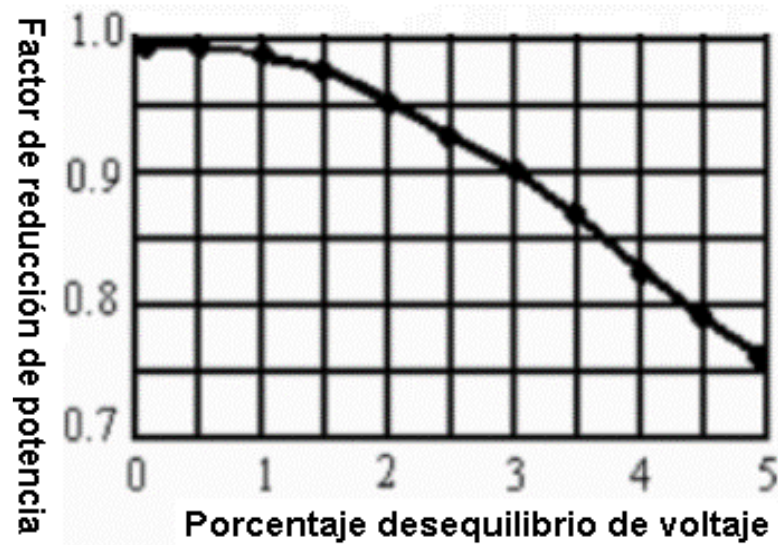
**2.3.1.2** *Desequilibrio de voltaje fase a fase.* Cuando los voltajes de línea aplicados a un motor de inducción no son iguales, corrientes de secuencia negativas son introducidas en el devanado del motor, provocando en el entrehierro un flujo opuesto al flujo rotativo del motor. Esto ocasiona que se reduzca el par e incremente la temperatura del motor.

Recomienda La Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA, 2012) niveles de degradación basados en el porcentaje de desequilibrio de voltaje, estableciendo la no operación del motor cuando el desequilibrio de voltaje se encuentra por encima del 5%.

Con un desequilibrio de voltaje de fase a fase, se debe multiplicar el HP de la placa por el valor de la degradación de la figura 6.

Si la aplicación requiere mayor al calculado, el desequilibrio debe corregirse antes de volver a operar el motor, el continuar con el desequilibrio del motor causa altas temperaturas internas y daños a las bobinas y al aislamiento.

Figura 6. Niveles de degradación basados en el porcentaje de desequilibrio de voltaje



Fuente: NEMA, 2012

**2.3.1.3 Voltaje terminal.** El voltaje tiene un efecto significativo sobre el funcionamiento del motor eléctrico, los cuales pueden ser:

Bajo voltaje: Este se produce cuando el motor eléctrico es operado por debajo de la tensión nominal.

Con un voltaje inferior habrá un aumento de la corriente para mantener una potencia requerida, esto no es alarmante, al no ser que el aumento exceda el valor nominal, haciendo que dentro del motor exista una acumulación de calor, dañando el sistema de aislamiento.

Alto voltaje: Una idea errónea común es que el alto voltaje tiende a reducir la corriente utilizada en un motor, esto no es siempre.

El alto voltaje tiende a saturar las partes magnéticas del motor, haciendo que se presente una corriente excesiva en el esfuerzo de magnetizar el hierro más allá de nivel que puede ser magnetizado rápidamente.

Generalmente los motores toleran un nivel señalado por el fabricante con un voltaje por encima del nominal.

Sin embargo niveles extremos harán que el amperaje genere recalentamiento en el motor provocando una disminución de su vida útil.

Estas tolerancias existen no para ser un estándar, sino para las oscilaciones de voltaje normales de la planta.

**2.3.1.4 Armónicos.** La presencia de distorsión armónica en el voltaje aplicado al motor incrementará las pérdidas eléctricas, aumentará la temperatura del motor y disminuirá la eficiencia, provocando aún más pérdidas.

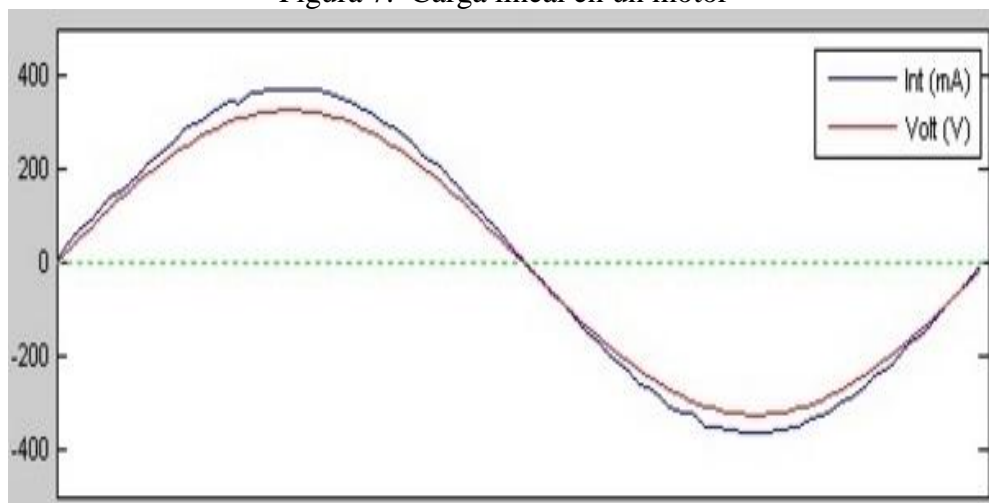
Los armónicos son distorsiones de las señales que son en forma sinusoidal y ocurren en los múltiplos de la frecuencia fundamental, generados por cargas no lineales.

Las cargas lineales son dispositivos de cargas eléctricas que en el estado de operación permanente, presentan esencialmente impedancia constante a la fuente de potencia durante todo el ciclo del voltaje aplicado.

Un ejemplo de una carga lineal es un motor. En la figura 8, se observa como la corriente es proporcional al voltaje en toda la onda sinusoidal.

Esto indica que si se toman valores para medir la resistencia en cualquier punto de la onda nos darán un resultado proporcional (BETHEL, 2015)

Figura 7. Carga lineal en un motor



Fuente: (BETHEL, 2015)

Cargas no lineales son cargas eléctricas en las cuales se muestra una corriente discontinua o cuya impedancia varía a través de todo el ciclo de la entrada de voltaje AC.

Ejemplos de cargas no lineales en un sistema industrial de distribución son luminarias electrónicas, variadores de frecuencia y motores DC, entre otros.

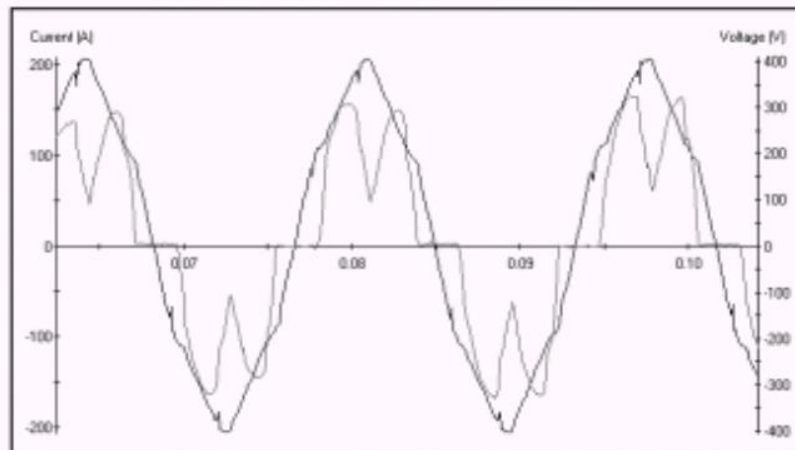
En la figura 8 se muestra una fase de voltaje y corriente que suministra un variador de frecuencia.

En la figura se puede observar que al tomar dos puntos los valores de cálculo de resistencia de dos puntos van a ser diferente valor.

Lo cual permite identificar de forma analítica que las cargas no son lineales, es decir la señal de corriente puede estar atrasada o la señal de voltaje puede estar adelantada.

El factor de tensión armónica (HVF) permite identificar de forma analítica las cargas.

Figura 8. Carga no lineal en un variador de frecuencia

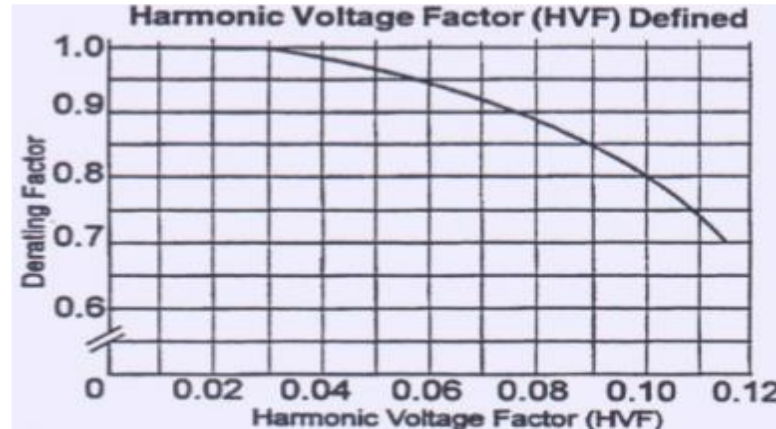


Fuente: (BETHEL, 2015)

Con la información de HVF de analizador energético, se puede analizar la curva de degradación de HVF de la figura 9, esta curva no se aplica cuando el motor es operado a

otra frecuencia diferente a la nominal o cuando es operado a un voltaje variable a la fuente de frecuencia.

Figura 9. Curva de degradación HVF



Fuente: (BETHEL, 2015)

No hay por lo general ninguna necesidad de liberar los motores si la distorsión de voltaje está dentro de los límites establecidos por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) en el estándar 51-1992 del 5% para el THD y del 3% para cualquier armónico individual. Los problemas de calentamiento excesivos comienzan cuando la distorsión de voltaje alcanza del 8 al 10% o más.

Tal distorsión debe ser corregida para alargar la vida del motor.

**2.3.2 Circuito de potencia.** El circuito de potencia se refiere a todos los conductores y conexiones que existen desde las barras que suministra potencia hasta las terminales en el motor. Esto puede incluir interruptores, fusibles, contactores, protecciones contra sobrecarga, seccionadoras y borneras.

Muchas veces un motor, aunque inicialmente está en perfecto estado de salud, es alimentado con un circuito defectuoso, causando problemas como desequilibrios de voltaje, desequilibrios de corriente, etc. Cuando estos problemas se hacen severos, se requiere de corrientes mayores para sostener la potencia de salida, provocando incrementar en la temperatura y daños en el aislamiento.

Altas resistencias por las conexiones en el circuito provocan un desbalance en el voltaje terminal del motor. Las consecuencias son: Sobrecalentamiento de los elementos adyacentes a las conexiones, pérdida de par o torque, descomposición de corrientes entre fases, sobrecalentamiento del aislamiento y disminución de la eficiencia del motor.

El desequilibrio de voltajes causará que el motor necesite más corriente para realizar el trabajo requerido. Por lo tanto hace que el cliente no solo se enfrente al daño prematuro del motor sino también a pagos potenciales de kilovatios

Otra consecuencia campo magnético que se opone a la rotación del motor. Esta carga adicional requiere un aumento de corriente. El efecto a largo plazo será la disminución de la vida del aislamiento. Una entrega de potencia desequilibrada, no solamente causa desequilibrio de voltajes sino también un alto porcentaje de desequilibrio de corriente. Algunas reglas se pueden tener en del desequilibrio de voltaje es la aparición de corrientes de secuencia negativa. Las cuales desarrollan un c cuenta al momento de solucionar un problema en el circuito de potencia, descritas a continuación:

- Un desequilibrio de voltaje puede causar un desequilibrio de corriente del 6% al 7%, según la Asociación de Servicios de Aparatos Eléctricos (EASA).
- Un desequilibrio de voltaje del 3,5% puede aumentar la temperatura de los devanados en un 2,5%.
- Un incremento de 10°C de la temperatura en los devanados a partir de la temperatura de diseño puede resultar en una reducción del 50% de la vida del motor.

El desequilibrio de voltaje causará que el motor marche a temperaturas por encima de la temperatura de diseño. Este sobrecalentamiento es debido a la aparición de las corrientes de secuencia negativa que causan en el motor una rotación opuesta a la rotación de funcionamiento. Estas temperaturas también provocarán la degradación del aislamiento y disminución de la vida del motor.

El porcentaje de aumento de la temperatura es aproximadamente dos veces el cuadrado del desequilibrio de voltaje. Por ejemplo, un desequilibrio de voltaje del 3% causará aproximadamente un aumento de temperatura del 18%.  $3^2 \times 2 = 18$

Un desequilibrio de corriente es un posible indicio de alta resistencia en conexiones. Sin embargo un desequilibrio de voltaje además del desequilibrio de corriente es un mejor indicador de este tipo de falla. La ubicación de la prueba determina si los desequilibrios de corriente y voltaje son generados por altas resistencias en conexiones.

Un desequilibrio de corriente con un desequilibrio de voltaje no indica necesariamente una falla en el circuito de potencia. Pueden haber otros aspectos que apunten a otra zona de falla, por eso es importante hacer un análisis integral. (BETHEL, 2015)

**2.3.3 Aislamiento.** Para equipo eléctrico en buena condición, una de las características más importantes es que el flujo de electricidad sigue caminos definidos o circuitos. Estos caminos son normalmente los conductores internos o externos del equipo. Es importante que el flujo de corriente esté confinado y no esté fugando de un componente a otro a través del material.

El deterioro del sistema de aislamiento puede causar una situación insegura para el personal expuesto a la fuga de corriente. Asegurando que el aislamiento está limitando el flujo de corriente eléctrica para aislar las partes conductoras y que el personal que entra en contacto con el aislamiento no esté en riesgo de volverse un conductor de baja resistencia para la corriente a tierra

Muchas influencias externas afectan la vida de los sistemas de aislamiento eléctrico. Estas influencias incluyen la contaminación de la superficie del aislamiento con químicos en el ambiente que atacan y destruyen la estructura molecular, daño físico debido al manejo inapropiado o choque accidental, vibración y excesivo calor por la cercanía al proceso industria.

Los transientes de voltaje en los conductores del aislamiento, así como los picos causados por variadores de frecuencia, pueden disminuir el esfuerzo dieléctrico al punto de falla.



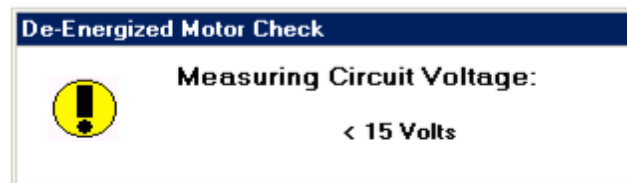
El deterioro ocurre en muchas formas y en muchos lugares al mismo tiempo.

La prueba adecuada del sistema de aislamiento de conductores, el análisis de datos colectados y apropiadas acciones correctivas pueden minimizar las posibilidades de fallas. Por lo tanto, el significado de entender la prueba del sistema de aislamiento nunca había sido tan importante

Según el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE 43-2000) afirma que antes de realizar cualquier prueba de aislamiento, las normas de seguridad deben seguirse. No es seguro comenzar la prueba hasta que la descarga de corriente y el retorno de voltaje sean insignificantes.

El retorno de voltaje debe ser menor a 20v después de que la tierra es removida, como se muestra en la figura 10. El Evaluador del Circuito del Motor (MCE) prueba este voltaje antes de continuar con la prueba. Al iniciar la prueba, se necesita que el voltaje entre línea y neutro sea menor a 15v. (BETHEL, 2015)

Figura 10. Evaluación del circuito del motor



Fuente: (BETHEL, 2015)

**2.3.4 Estator.** Los mecanismos con mayor probabilidad de falla en un bobinado de estator son espira-a-espira, fase-a-fase o corto de espira a- tierra. Un corto entre espiras es identificado como el de uno de los bobinados de un arrollamiento.

Esto puede generar una muy baja impedancia en la red de cables, la cual actúa como un corto en el secundario de un transformador de corriente.

Esto resulta en excesivo flujo de corriente a través de la red en corto, creando un intenso calor y daño en el aislamiento.

Debido a la naturaleza de un diseño cualquiera de un arrollamiento al azar, un corto en una espira podría ocurrir con una impedancia más alta, permitiendo que el motor funcione durante un extenso período de tiempo antes de que se destruya el arrollamiento por las corrientes altas, como resultado no es usual encontrar motores con devanado al azar operando con malos devanados en el estator.

La forma del enrollado no muestra alta impedancia en la espira y por lo tanto se calentará rápidamente continuando con el corto entre espiras.

Un corto entre fases es identificado como un corto de una o más fases a otra fase. Esta falla puede ser un daño total debido a la posibilidad de un gran potencial de voltaje entre las fases y la ubicación del corto.

**2.3.5**      *Rotor.* Encendiendo un motor con las barras rotas en el rotor, causa calor excesivo generado alrededor de la vecindad de las barras rotas.

Esto puede propagarse a otras barras del rotor y destruir el aislante alrededor de las placas o laminaciones. Esto también puede afectar a otras partes del motor.

El aislante del estator no puede aguantar el calor intenso desarrollado por las barras rotas del rotor y fallará. Muchas veces las barras rotas del rotor no son fácilmente vistas sin la tecnología y pueden ser la causa de la falla del rotor.

Esto puede resultar en un rebobinado y cambio de rodamientos, pero no una reparación del roto, cuando el motor vuelve a servicio, tiene el mismo problema y presenta los mismos síntomas junto con el daño del aislamiento.

**2.3.6**      *Entrehierro.* La zona entrehierro describe el espacio entre el rotor y el estator. Excentricidad del entrehierro es una condición que ocurre cuando el espacio entre el rotor y el estator no es uniforme.

Esta excentricidad, hay una variación del flujo magnético en el entrehierro creando desequilibrios en el flujo de corriente, los cuales pueden ser identificados en el espectro de corriente. Este desnivel afectará los resultados de la prueba RIC.

Excentricidad estática ocurre cuando el centro del eje está en constante desalineamiento con la línea centro del estator.

Excentricidad dinámica ocurre cuando la línea central del eje está en variable desalineamiento con la línea centro del estator, tal como suceden cuando hay un rodamiento desgastado

## **2.4 Principales fallas en motores trifásicos asíncronos tipo jaula de ardilla**

La clasificación de las principales fallas de los motores trifásicos asíncronos tipo jaula de ardilla, son los siguientes:

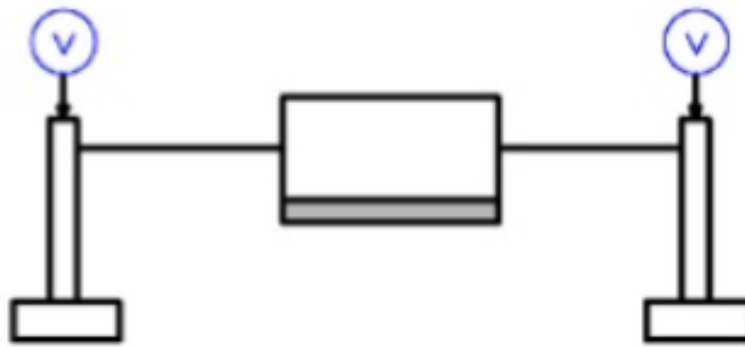
### **2.4.1 *Fallas mecánicas.***

**2.4.1.1 *Desbalance mecánico.*** El desbalance o desequilibrio de voltajes, pueden ocasionar graves alteraciones en la corriente, que pueden provocar un rápido sobrecalentamiento del motor.

**2.4.1.1.1 *Tipos de desbalances.*** Entre los desbalances de un motor trifásico puedes ser tres tipos y son:

- *Desbalance estático.* Es su sobrepeso en una sección del rotor el cual se caracteriza por que la amplitud de la vibración se incrementa en proporción al cuadrado de la velocidad.
- Al momento de realizar las mediciones con los sensores colocados como se muestra en la figura 11, las señales están en fase.

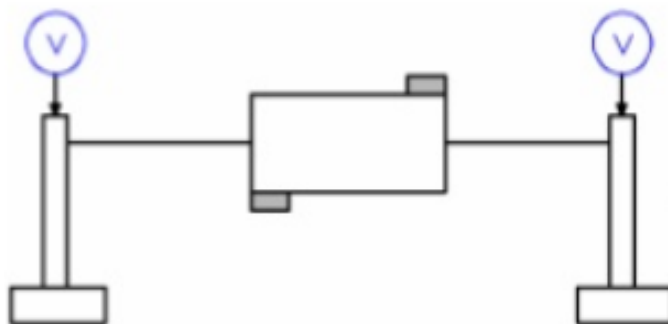
Figura 11. Desbalance estático



Fuente: BETHEL, 2010

- *Desbalance en dos planos o tipo par.* Se presenta como en la figura 12, cuando dos pesos están dispuestos en diferentes planos del rotor el igual que en el caso anterior la amplitud es proporcional al cuadrado de la velocidad, las diferencia es que las mediciones de los sensores de vibración están desfasados  $180^\circ$ . Dominando la frecuencia a  $1x$  RPM.

Figura 12. Desbalance en dos planos o tipo par



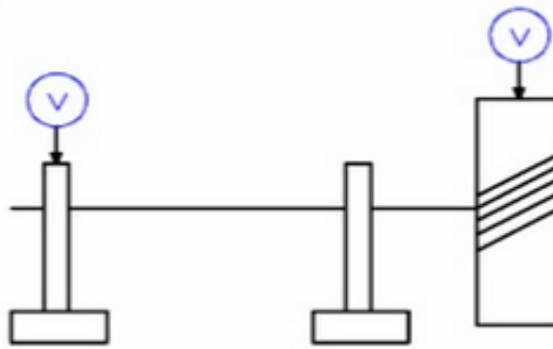
Fuente: BETHEL, 2010

- *Desbalance por rotor colgante.* Esta falla ocurre en motores que se encuentran en el extremo de un eje, se produce por desgaste en la superficie del rotor y doblamiento del eje.

El espectro presenta vibración dominante a  $1x$ RPM del rotor, muy notoria en dirección axial y radial, como se indica en la figura 13.

El desbalance por rotor colgante incrementa la temperatura en le cojinete.

Figura 13. Desbalance por rotor colgante



Fuente: BETHEL, 2010

**2.4.1.1.2** *Causas de desbalance.* Las causas que pueden ocasionar desbalance son:

- Aglomeración desigual de polvo en los alabes de un ventilador.
- Excentricidad del rotor.
- Falta de homogeneidad en partes colgadas.
- Errores de máquina.
- Erosión y corrosión desigual de las impulsoras de una bomba.

**2.4.1.2** *Falla en los rodamientos.* Estas fallas son las más comunes en los motores, se manifiestan por vibraciones de alta frecuencia, de hasta 12 x RPM. Cuando el daño aumenta las frecuencias van disminuyendo. Una vez detectada la falla el rodamiento debe ser reemplazado.

**2.4.1.2.1** *Causas de fallas en rodamientos.* Entre las principales causas que provocan las fallas en rodamientos son:

- Cargas excesivas.
- Falta de alineación.
- Defectos de asientos del eje.
- Sellado deficiente y lubricación inadecuada.
- Montaje defectuoso.

**2.4.1.3** *Excentricidad.* La excentricidad es otra causa común de vibración en una maquina rotativa. Esta se produce cuando la línea central del eje no es la misma que la línea central del rotor, y el centro de rotación verdadero difiere de la línea central geométrica.

**2.4.1.3.1** *Tipos de excentricidades.* Entre los principales tenemos

- Excentricidad de tipo estática
- Excentricidad de tipo dinámica
- Excentricidad combinada estática- dinámica:

**2.4.2** *Fallas eléctricas.*

**2.4.2.1** *Fallas en la simetría de los bobinados del estator.* Estas fallas se producen por defectos de construcción, especialmente en motores que han sido rebobinados en talleres sin seguir normas técnicas. La asimetría de los bobinados producen pequeños campos magnéticos que giran en sentido contrario al campo magnético del estator, este esfuerzo alcanza su máximo valor en el momento de arranque del motor.

**2.4.2.2** *Fallas en la simetría de los bobinados del rotor.* Estas fallas en el rotor se deben también a fallas constructivas, barras rotas o agrietadas y barras sueltas dañando a los devanados del estator, cuando se producen deformaciones.

**2.4.2.3** *Ranuras del estator y ranuras del rotor.* Las ranuras del estator y del rotor son agujeros, los bordes de las láminas son redondas y su conformación longitudinal es el resultado del apilamiento de láminas. Estas hojas son aisladas unas con otras. Impidiendo que las corrientes inducidas magnéticamente circulen en el hierro y provoquen calentamiento.

**2.4.2.4** *Bobinado del rotor.* Las barras del rotor agrietadas generan bandas laterales a la frecuencia de paso de polos alrededor de 1x por sus armónicos.

A menudo se verá un espectro muy lleno, con armónicos de 1x cada uno con faldas de

bandas laterales a la frecuencia de paso de polos.

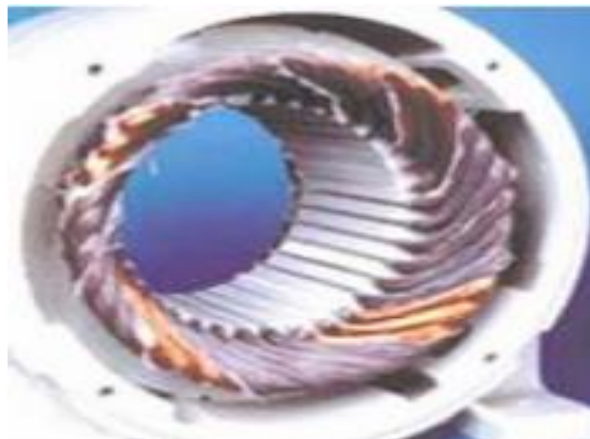
Este producirá una firma de vibración que varía lentamente en amplitud a dos veces la frecuencia de deslizamiento del motor. Fenómeno llamado batido, el mismo que puede ser oído además de medido.

**2.4.2.5 Paquetes de bobinas del estator.** La mayoría de las fallas que se producen están relacionadas con los daños en el estator que se producen por el deterioro del aislamiento de las bobinas.

Entre las causas típicas de las fallas en bobinas del estator, tenemos:

- Operación entre 2 fases. Esta falla se indica en la figura 14, es el resultado de la operación cuando una fase del sistema de potencia se abre o falla, pudiendo ser por un fusible quemado, contactor abierto, entre otros.
- Temperatura sobre pasa el valor para el cual fue diseñado el motor
- Desalienación en paralelo
- Desequilibrio de fases.
- Inadecuada selección del calibre de conductor del circuito de potencia.

Figura 14. Operación entre dos fases



Fuente: BETHEL, 2010

- Corto circuito entre fases: Esta falla se observa en la figura 15, esta es causada por la presencia de contaminantes, materiales abrasivos, vibración o picos de voltaje.

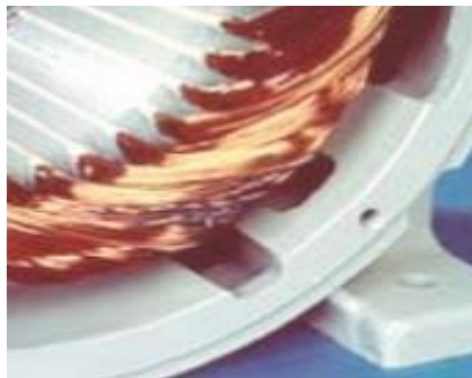
Figura 15. Corto circuito entre fases



Fuente: FITZGERALD, 2004

- Cortocircuito entre espiras: Esta falla de la figura 16, es causada por la presencia de contaminantes, materiales abrasivos, vibración o picos de voltaje.

Figura 16. Cortocircuito entre espiras



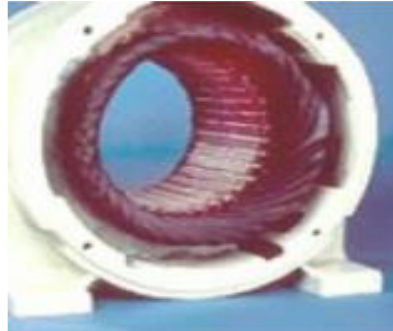
Fuente: FITZGERALD, 2004

- Cortocircuito en bobina, cortocircuito en conexión, falla a tierra en extremo de ranura y falla a tierra dentro de ranura: Estas fallas son causada por presencia de contaminantes, materiales abrasivos.
- Falla por desbalance de voltajes. Esta falla provoca deterioro térmico del aislamiento en una fase del bobinado ya sea por desbalances de cargas en el sistema eléctrico, conexiones deficientes en los terminales del motor.



- Falla por sobrecarga. El deterioro térmico del aislamiento en las fases del bobinado de la figura 17, es causado por demanda de carga que exceden la potencia del motor, excediendo los voltajes estándar según La Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos de los Estados Unidos (NEMA.)

Figura 17. Falla por sobrecarga



Fuente: FITZGERALD, 2004

- Falla por rotor bloqueado. El deterioro térmico del aislamiento es provocado por la falla en rodamientos o por arranques o reversión de giros excesivos.
- Falla por picos de voltaje. Estas fallas de la figura 18, son causadas por el swicheo en los circuitos de potencia, descarga eléctrica, descarga de capacitores y los efectos de dispositivos de estado sólido como variadores de frecuencia.
- Bobinados del estator sueltos. Este falla es muy destructiva, eleva los niveles de vibración a dos veces la frecuencia, aumentando la red, lo cual daña el aislamiento de los conductores, provoca cortocircuitos entre los devanados, incluso a tierra y fallo del estator.

Figura 18. Fallas por picos de voltaje



Fuente: FITZGERALD, 2004

### **2.4.3** *Fallas de enlace por potencia.*

**2.4.3.1** *Desalineación en acoples de eje.* La desalineación consiste en que los centros de unos ejes acoplados no coinciden provocados por una desalineación paralela y angular.

El diagnostico se basa en vibración dominante a dos veces la velocidad de giro, con niveles altos a la velocidad de giro en la dirección axial, y bien en la dirección vertical u horizontal.

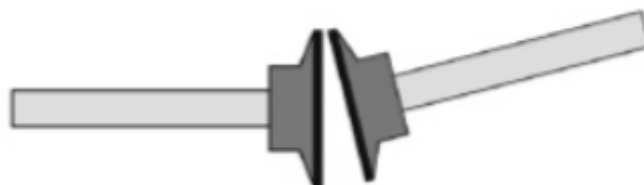
**2.4.3.1.1** *Causas de desalineación.* Es causada por las siguientes condiciones:

- La posición relativa de los componentes se altera después del montaje.
- Ensamblado impreciso de los componente.
- Distorsión debido a fuerzas en tuberías.
- El frente del acoplamiento no está perpendicular al eje de la flecha.
- Expansión de la estructura de la maquina debido al alza de la temperatura.

**2.4.3.1.2** *Tipos de desalineación.* Se pueden presentar tres tipos de desalineación:

Desalineación angular: Esta falla que se observa en la figura 19, se da cuando dos ejes no son paralelos en su punto de acople. El cual se caracteriza por una elevada vibración axial que puede ser de 1x RPM o 2x o 3x con un desfaseamiento de 180° con la vibración radial en el acoplamiento.

Figura 19. Desalineación angular

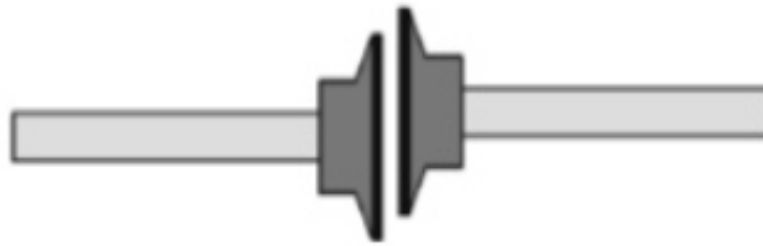


Fuente: BETHEL, 2010

Desalineación paralela: Esta desalineación de la figura 20, se produce cuando dos ejes paralelos no coinciden en el punto de acople.

Dando como resultado una fuerza cortante como un momento flector en el lado de acoplamiento de cada eje, presenta síntomas similares al angular, solo que en este caso la vibración es radial con un desfase aproximado de  $180^\circ$  con el acoplamiento.

Figura 20. Desalineación paralela

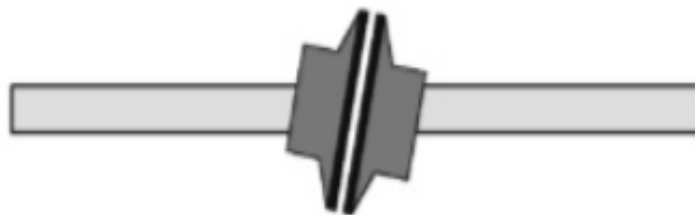


Fuente: BETHEL, 2010

Desalineación por cojinete inclinado con respecto al eje: Este genera una considerable vibración axial

Causando incluso movimientos torsional con cambios de fase de  $180^\circ$  de arriba a abajo o de lado a lado cuando se mide en dirección axial sobre la caja del cojinete, como se muestra en la figura 21. Ocasiona un desgaste acelerado del eje.

Figura 21. Desalineación por cojinete inclinado con respecto al eje



Fuente: BETHEL, 2010

**2.4.3.2 Fallas en engranajes.** La vibración normalmente ocurre a una frecuencia igual a la frecuencia de engrane de los engranajes, por desgaste excesivo de los dientes, inexactitud de los dientes, fallas de lubricación y materias extrañas atrapadas entre los dientes.

**2.4.3.3 Transmisión de potencia en poleas.** Para la transmisión de potencia debe emplearse la banda derrapada sobre la ranura de la polea.

Entre las fallas que ocurre esta la distensión, desalineación de poleas, excentricidad y resonancia de la banda.

Estas fallas ocurren por Sobrepaso de la vida útil de la banda, Ejes de poleas desalineados, Poleas excéntricas o bandas demasiado tensionadas.

Las frecuencias de bandas están siempre por debajo de la frecuencia del motor, para corregir el problema reemplace la banda, si no presenta demasiado desgaste. (SLIDERSHARE, 2013)

## **2.5 Pérdidas energéticas**

La eficiencia energética es un conjunto de programas y estrategias para disminuir la energía consumida para producir bienes y dar servicios sin que la calidad de ambos se vea afectada.

Los motores eléctricos de inducción tipo jaula de ardilla deben cumplir con los requisitos de la norma NTE INEN 2 498: 2009.

Donde la eficiencia está definida como razón entre la potencia de salida y potencia de entrada del motor eléctrico, expresándose en por ciento y se calcula según la siguiente relación:

$$Eficiencia(\%) = \left( \frac{Potencia_{salida}}{Potencia_{entrada}} \right) \times 100 \quad (1)$$

**2.5.1 Analizador energético.** El analizador que es un instrumento manual, que proporciona un conjunto valioso y completo de medidas para comprobar sistemas de distribución eléctrica. Algunos proporcionan una impresión general del rendimiento del sistema de alimentación eléctrica, en cambio otros utilizan para investigar detalles

específicos. El analizador energético además ayuda a ver si las conexiones para la toma de datos están de manera adecuada

Figura 22. Analizador energético



Fuente: FLUKE 435-II

**2.5.1.1** *Características del analizador energético marca Fluke 435-II.* Este analizador Fluke 435-II tiene las siguientes características:

- Este equipo permite el análisis a plazo largo, descubriendo fallas intermitentes o difíciles de encontrar. (FLUKE, 2012)

Este equipo tiene las siguientes características de entrada de tensión y de corriente indicados en la tabla 1.

Tabla 1. Características de entrada de tensión y corriente del analizador energético

Entrada de tensión		Entrada de corriente	
Número de entradas	4 (3 fases + neutro)	Número de entrada	4 (3 fases + neutro) acoplados en CC o CA.
Tensión máxima de entrada	1.000 Vrms	Tipo	Pinza en transformador de corriente con salida mV/A
Rango de tensión nominal	Se puede seleccionar entre 1V y 1.000	Rango de entrada nominal	0 - $\pm 3,0$ pico de tensión, onda sinusoidal de 0 – 3,97 Vrms 0 - $\pm 3,0$ pico de tensión, onda sinusoidal de 0 – 3,97 Vrms
Tensión máxima de medida de picos	6 KV ( modo de transitorios solamente)	Rango	0,5 Arms a 600 Arms 5 Arms a 6.000 Arms 0,1 mV/A a 1 V/A y personalizado para su uso con pinzas de CA o CC opcionales
Impedancia de entrada	4 M $\Omega$ // 5Pf	Impedancia de entrada	1 M $\Omega$

Tabla 1. (Continuación)

Ancho de banda	> 10 kHz, hasta 100 kHz para modo de transitorios	Ancho de banda	> 10 kHz
Factor de escala	1:1, 10:1, 100:1, 1.000:1, 10.000:1 y variable	Factor de escala	1:1, 10:1, 100:1, 1.000:1, 10.000:1 y variable

Fuente: MANUAL FLUKE 435-II, 2012

- Realiza captura de datos PowerWave, capturando valores RMS de manera rápida para ver cualquier forma de onda y determinar cómo interactúan los valores de voltaje, corriente y frecuencia.

Aplicaciones:

- Captura de datos Powerwave
- Eficiencia de inversión de potencia
- Cuantificación monetaria d la energía
- Análisis de la energía
- Detección y resolución de problemas en primer nivel de actuación
- Mantenimiento predictivo
- Análisis a largo plazo
- Estudios de carga

## 2.6 Termografía

La termografía se ha convertido en una herramienta de diagnóstico muy poderosa para el mantenimiento predictivo, identificando anomalías difíciles de detectar a simple vista, permitiendo realizar correcciones antes de que se produzcan costosos fallos en el sistema. (ISO18434-1, 2008)

**2.6.1** *Física térmica para el mantenimiento predictivo.* Para interpretación correcta de la termografías se necesita conocer los distintos materiales y circunstancias que influyen en las lecturas de temperatura de las cámaras termográficas. Entre los factores que influyen en las lecturas de temperaturas son los siguientes:

**2.6.1.1** *Conductividad térmica.* La diferencia en la conductividad térmica de dos materiales puede provocar importantes diferencias de temperatura en ciertas situaciones, es decir el aislamiento se suele calentar lentamente, mientras que los metales se suelen calentar rápidamente. Esto se denomina conductividad térmica.

**2.6.1.2** *Emisividad.* La emisividad se define como la capacidad que tiene un cuerpo para emitir infrarrojos. Depende en gran medida de las propiedades de los materiales del cuerpo, es muy importante tomar en cuenta la emisividad para leer bien las temperaturas.

**2.6.1.3** *Reflexión.* Las reflexiones pueden ocasionar una interpretación incorrecta de la termografía, por tanto se debe elegir cuidadosamente el ángulo desde el que la cámara termográfica apunta al objeto y la temperatura ambiente, para compensar la temperatura aparente reflejada, con el fin de evitar reflexiones, ya que algunos materiales reflejan la radiación térmica del mismo modo que un espejo refleja la luz visible. Entre estos están los metales no oxidados, especialmente si se han pulido.

**2.6.1.4** *Condiciones meteorológicas.* La temperatura ambiente puede tener una gran influencia en las lecturas de temperatura. Tanto la luz solar directa, sombras, viento, la lluvia o una elevada temperatura ambiente puede ocultar puntos calientes al calentar todo el objeto, mientras que una temperatura ambiente baja podría enfriar los puntos calientes hasta una temperatura inferior a un umbral determinado previamente.

**2.6.1.5** *Sistemas de calefacción y ventilación.* Las influencias externas en la temperatura de la superficie también se pueden encontrar en el interior. La temperatura ambiente puede influir sobre la temperatura de la superficie del objeto, pero también hay otro factor: el control del clima.

Los sistemas de calefacción crean diferencias de temperatura que pueden generar

patrones térmicos incorrectos. Los flujos de aire frío de ventiladores o sistemas de aire acondicionado pueden tener el efecto contrario, refrigerar el material de la superficie mientras los componentes situados por debajo de la superficie permanecen calientes, lo que puede provocar que no se detecten posibles defectos.

**2.6.2 Cámaras termográficas.** Las cámaras termográficas son una herramienta fiable capaz de visualizar y analizar a distancia la distribución de temperatura de superficies completas de equipamientos eléctricos y maquinarias con gran rapidez y precisión.

Permiten llevar a cabo medidas preventivas para evitar costosas averías o daños catastróficos. En la figura 23 se puede apreciar un tipo de cámara termográfica. Permite realizar la toma de datos sin detener los sistemas.

Figura 23. Cámara termográfica



Fuente: FLIR.net

**2.6.2.1 Requisitos esenciales para un correcto análisis termográfico.** Para realizar un correcto análisis termográfico se debe evaluar seis requisitos esenciales y son:

1. Resolución de la cámara / calidad de la imagen.
2. Sensibilidad térmica.
3. Precisión.
4. Funciones de la cámara.
5. Software.
6. Demandas de formación.
7. Capacitación del software



**2.6.3 Criterios de análisis termográfico para sistemas eléctricos.** En el criterio Delta de temperatura existen normas o estándares usados para evaluar y clasificar la diferencia de temperatura resultante, los cuales son:

1. Los criterios establecidos por la Internacional Electric Testing Association -NETA ATS-1989-, los cuales proporciona rangos muy estrictos para la clasificación de temperaturas.

En la tabla 2, se muestra los criterios para ayudar a determinar el grado de severidad de un problema, según la Norma de Pruebas Eléctricas Aceptadas (NETA), en el cual esta investigación se va a guiar.

Los criterios de severidad de un problema se indican a continuación en la tabla 2. En donde se puede identificar el nivel de severidad la temperatura la clasificación y la acción que se recomienda para cada caso. Los criterios de severidad se determinan Sobre temperatura ambiente, O Sobre temperatura de cuerpo similar en condición.

Tabla 2. Criterios de severidad de un problema eléctrico

Nivel	Temperatura medida	Clasificación	Acción
1	1°C a 10°C O/A 1°C a 3°C O/S	Posible deficiencia.	Se requiere mayor información.
2	11°C a 20°C O/A 4°C a 15°C O/S	Probable deficiencia.	Reparar en la próxima parada disponible.
3	21°C a 40°C O/A >15°C O/S	Deficiencia.	Reparar tan pronto como sea posible.
4	>40°C O/A >15°C O/S	Deficiencia mayor.	Reparar inmediatamente.
O/A= Sobre temperatura ambiente. O/S= Sobre temperatura de cuerpo similar en condición.			

Fuente: NORMA NETA

## CAPÍTULO III

### 3. CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE PRUEBAS

#### 3.1 Alcance y objetivos del módulo de pruebas

**3.1.1** *Definición del alcance del módulo de pruebas.* Implementar un módulo didáctico de pruebas para el análisis de los modos de falla en los motores trifásicos asincrónicos tipo jaula de ardilla contribuye a ampliar las habilidades en una de las técnicas más importantes del mantenimiento predictivo llamada termografía combinado con el análisis energético. La combinación de las dos técnicas es de vital importancia para que el ingeniero de mantenimiento pueda analizar los modos de falla que generen incremento de temperatura de desalineación y desequilibrio de tensiones en los motores eléctricos, evitando pérdidas económicas a la empresa y conservando el medio ambiente.

Figura 24. Alcance del módulo de pruebas



Fuente: (CIFP, 2013)

**3.1.2** *Objetivos de la construcción del módulo de pruebas.* La construcción del módulo de pruebas se lleva a cabo teniendo en cuenta los siguientes objetivos:

- Desarrollar en los estudiantes habilidades, para detectar fallas en los motores trifásicos asíncronos tipo jaula de ardilla, mediante técnicas de mantenimiento predictivo para análisis de los modos de fallo de desalineación en paralelo y desequilibrio energético.

- Analizar dos zonas de falla tanto de desalineación como de desequilibrio de tensiones que generan incremento de temperatura en los motores trifásicos asíncronos tipo jaula de ardilla.
- Para conseguir los objetivos del análisis del diseño del módulo de pruebas se tomó en cuenta las diferentes variables que presenta el sistema como son presencia de vibraciones, intensidad de corriente eléctrica, temperatura las mismas que son de vital importancia para el análisis de la evolución de los modos de fallo.

### **3.2 Características requeridas del módulo de pruebas**

Las características principales del módulo de pruebas son seguridad, eficacia y flexibilidad, el mismo que consta de tres tipos de sistemas básicos para su correcto funcionamiento y cumplimiento de sus objetivos:

- El sistema mecánico es básicamente toda la estructura que sostiene todos los elementos del módulo de pruebas.
- El sistema eléctrico está conformado por dispositivos de protección y control donde el motor eléctrico trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla suministra a la bomba de energía necesaria para su funcionamiento bajo condiciones y parámetros requeridos para el cumplimiento de los objetivos de la investigación.
- Y finalmente el sistema hidráulico que consta de una bomba centrífuga, accesorios hidráulicos y un recipiente en la cual se recirculaba el líquido refrigerante para el análisis de la evolución de los modos de falla en el motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla.

### **3.3 Construcción del módulo de pruebas**

Para la construcción del módulo de pruebas se realizó considerando la función que debe cumplir el módulo didáctico y la evolución de los modos de fallos que se generan en los motores asíncronos tipo jaula de ardilla. En este caso permitir tomar datos de la

evolución de los modos de fallo bajo condiciones y parámetro requeridos.

La desalineación y desequilibrio de tensiones en un motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla, para lo cual se distribuye en diferentes sistemas, de la manera más adecuada y con la consideración de las recomendaciones de los fabricantes de los diferentes equipos y componentes del módulo, para la realización de las pruebas, mantenimiento, montaje y desmontaje de los equipos.

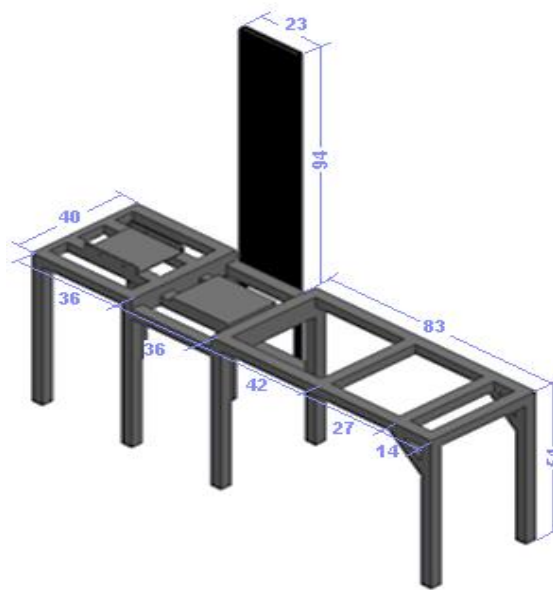
El modulo está construido con tres sistemas:

- Sistema eléctrico.
- Sistema mecánico.
- Sistema hidráulico.

**3.3.1**      *Sistema mecánico.* Para realizar el sistema mecánico primero se realizó una estructura metálica en Solid Work con las dimensiones de los equipos del motor eléctrico.

Con la ayuda del Frame de la bomba de eje libre se realizó la estructura para que el montaje de la bomba centrífuga. Se consideró las dimensiones del recipiente. Tablero de control y demás elementos que conforman el módulo de pruebas con las siguientes características de la figura 25. Tomando en cuenta las dimensiones con tolerancias según manuales del fabricante y de datos de sus propias estructuras:

Figura 25. Sistema mecánico del módulo de pruebas

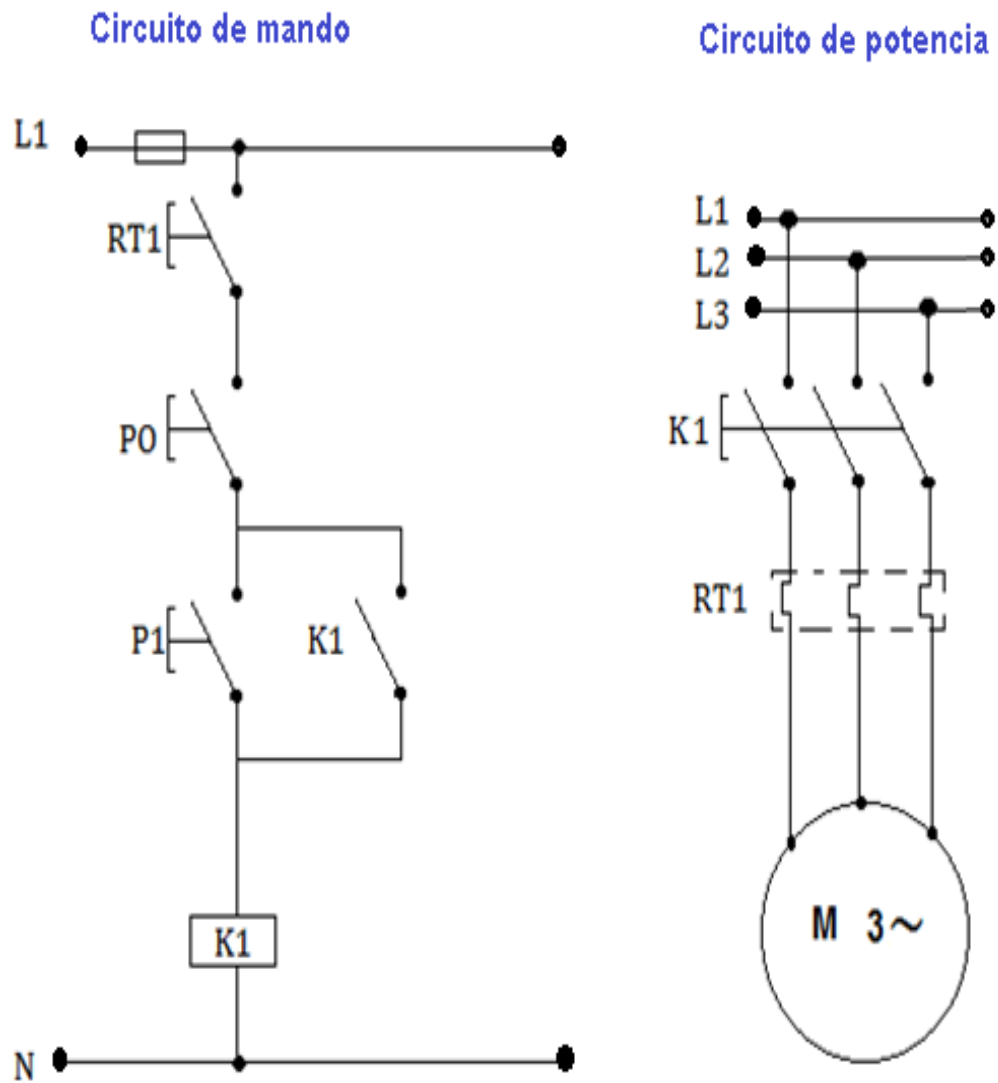


Fuente: AUTOR

**3.3.2 Sistema eléctrico.** El sistema eléctrico del módulo de pruebas permitió proyectarse un orden, un arreglo de los conductores, materiales y equipos, con el fin de utilizar la energía eléctrica de una forma más segura y eficaz desde la fuente de suministro hasta los dispositivos de protección y control del sistema.

En la figura 26 se presenta el circuito de mando y potencia del módulo de pruebas. El circuito de mando se realizó en Festo fluidsime, en cual se puede identificar las diferentes partes por medio de representaciones gráficas. El sistema eléctrico se proyectó con el fin de generar un modo de fallo en los conductores que suministran la energía al motor. La cual fue una conexión de dos focos en paralelo a 2 de las tres fases del motor.

Figura 26. Circuito de mando y potencia del módulo de pruebas



Fuente: AUTOR

Antes de realizar la conexión de los diferentes elementos y equipos eléctricos se realizó la selección del calibre del conductor para su normal funcionamiento, calculando la sección del conductor de la siguiente manera, con ayuda del anexo 1:

#### DATOS:

$I = 6 \text{ A}$

Potencia: 2HP

$U = 220 \text{ V} / 440 \text{ V}$

$\rho = 0,018 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$

Cable utilizado: ?

Para la selección de calibre se emplea la siguiente formula donde el valor de  $\Delta U = 0,114$  y  $\cos\phi = 0,6$  se detalla en el anexo 2 y en el anexo 3.

$$S = \frac{\sqrt{3} * \rho * L * I * \cos\phi}{\Delta U} \quad (2)$$

$$s = \frac{\sqrt{3} * 0,018\Omega * \text{mm}^2/\text{m} * 2\text{m} * 6\text{A} * 0,6}{0,114}$$

$$s = \frac{0,27}{0,125} \text{mm}^2$$

$$s = 2,23 \text{mm}^2 \text{ Calibre 14}$$

**3.3.3 Sistema hidráulico.** En el sistema hidráulico es el encargado de recircular el fluido que es la carga de trabajo, la cual será impulsada por el motor eléctrico luego de la transformación de la energía eléctrica en energía mecánica rotacional, dicha energía será transmitida a la bomba con un acople tipo araña en donde el impulsor es el encargado de recircular el fluido.

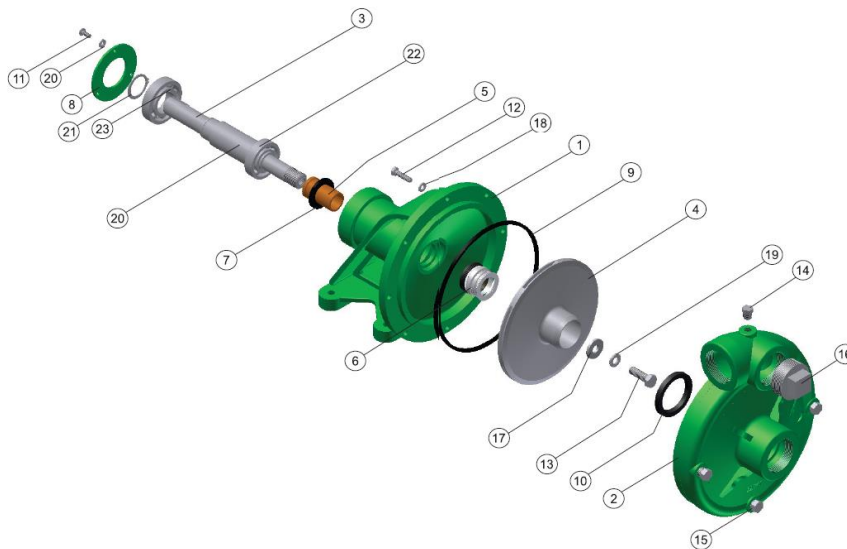
Primero se seleccionó la bomba centrífuga de eje libre identificando previamente los componentes y dimensiones de la misma, como se indica en la figura 27.

Para cumplir con las características y condiciones requeridas de la construcción del módulo de pruebas.

Para la elaboración del sistema se consideró las dimensiones de del diámetro de succión y descarga de la bomba.

Figura 27. Componentes y dimensiones de la bomba centrífuga

### COMPONENTES DE LA BOMBA CENTRIFUGA



Nº	Componente	Cantidad
1	PEDESTAL	1
2	CUERPO FE	1
3	EJE	1
4	IMPULSOR FE $\phi$ 8200"	1
5	CAMISA BR 1-1/4	1
6	SELLO MEC. 1-1/4	1
7	ARANDELA CAUCHO 1-13/64	1
8	TAPA BALINERA EN LÁMINA	1
9	ANILLO CUADRADO CAUCHO	1
10	COPA "U"	1
11	TORNILLO 1/4 X 5/8 NC C.GZO IR	3
12	TORNILLO 5/16 X 1-1/4 NC C.GR.5 ZIN	8
13	TORNILLO 1/2 X 1 1/2 NF C.GR.5	1

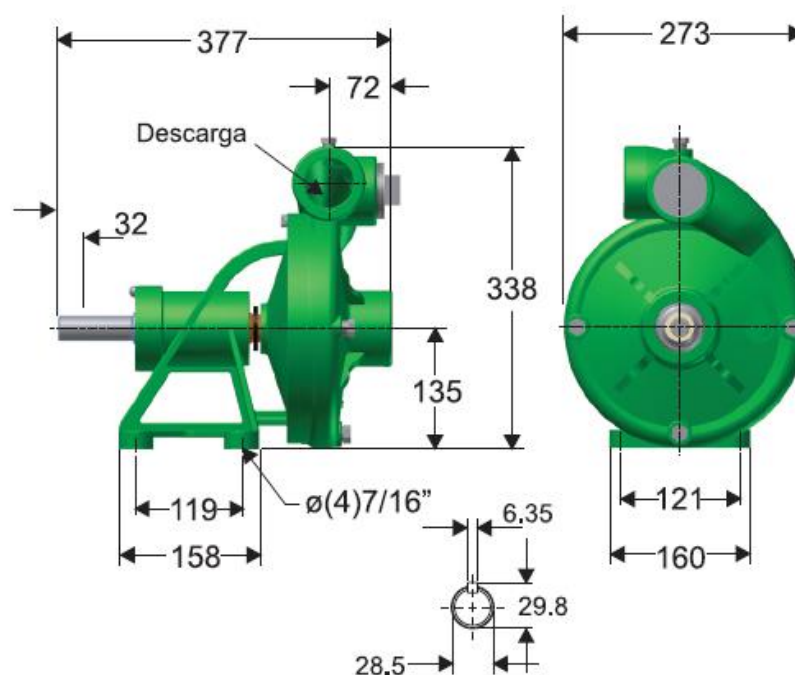
Figura 27. (Continuación)

14	TAPÓN BR. 1/4 NPT	1
15	TAPÓN GALV. 3/8 NPT	3
16	TAPÓN GALV. 2 NPT	1



17	ARANDELA DE RETENCIÓN	1
18	GUASA 5/16 ACERO GR.5	8
19	GUASA 1/2 ACERO GR.5	1
20	GUASA ¼ ACERO GR.5	3
21	ANILLO SEEGER REF A-36	1
22	RODAMIENTO 6206 ZZ	1
23	RODAMIENTO 6207 ZZ	1

#### DIMENSIONES DE LA BOMBA CENTRIFUGA



Fuente: MANUAL DE BOMBAS DE AGUA BARNES

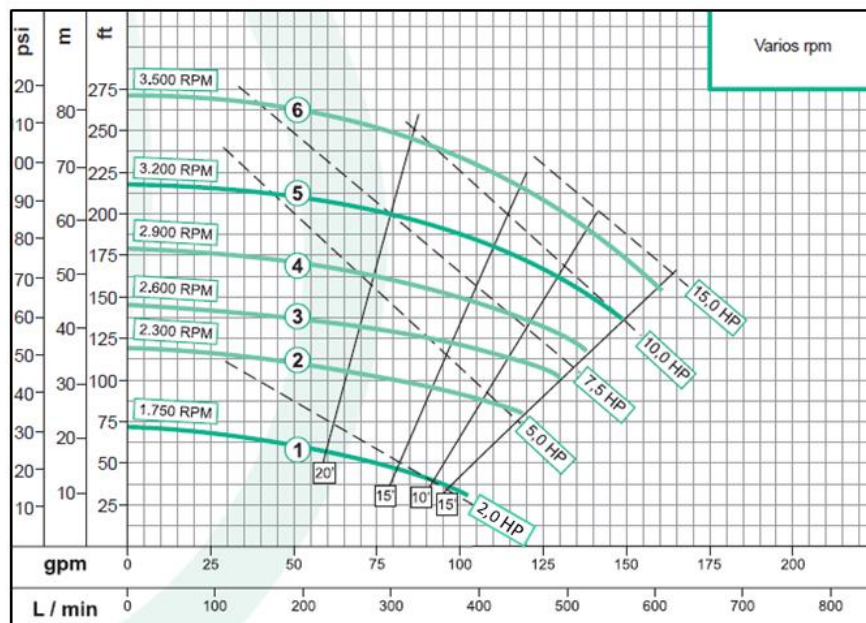
La curva de rendimiento de la bomba se detalla en la figura 28.

La curva de rendimiento que se utilizó en el caso del análisis de la evolución del modo de fallo para un motor trifásico tipo jaula de ardilla de 2HP indica que:

Un motor de 2HP de potencia impulsa 20m a una presión aproximada de 30PSI. Para lo cual se va a realizar un sistema de tubería aproximado para obtención de los datos cuando los fallos evolucionen considerando el valor de la carga de trabajo. El trabajo descrito de la curva de la bomba de la fig. 28 será considerando siempre y cuando que el

motor sea fabricado para el funcionamiento en bajas revoluciones (1700) rpm.

Figura 28. Curva de rendimiento de la bomba centrífuga



Fuente: MANUAL DE BOMBAS DE AGUA BARNES

### 3.4 Descripción de componentes del módulo de pruebas

El módulo de pruebas está constituido de diferentes componentes los cuales se detallan en la tabla 3. La selección del acople Love Joy o tipo araña se realizó en función al diámetro del eje libre de la bomba que es el de mayor diámetro. La selección del acople con elastómero permite por sus características reducir las cargas en acoplamientos desequilibrados. Permiten la separación de la maquina motriz y la conducida. Son capaces de absorber las vibraciones que afectan al sistema y su duración depende de la alineación del sistema.

Tabla 3. Listado de componentes del módulo de pruebas

Componentes del módulo de pruebas			
Elemento	Cantidad	Elemento	Cantidad
<b>Sistema mecánico</b>		<b>Sistema hidráulico</b>	
Tubo hierro cuadrado de 1' ½	6m	Bomba centrífuga	1
<b>Sistema eléctrico</b>		Tubería	4m


Tabla 3. (Continuación)

Motor eléctrico trifásico(MAJA 3F)	1	Manómetro de presión	1
Tablero de control eléctrico	1	Válvula tipo compuerta	1
Interruptor eléctrico	1	Acople tipo araña de	1
Contactor	1	Universal	1
Relé térmico	1	Acople para tanque	1
Cable calibre 14	5m	Codos	3
Cable flexible calibre 3x14	3m	Reducción tipo campana	1
Focos	4		
Enchufe	1	Acople tipo T	1
		Recipiente	1

Fuente: AUTOR

**3.4.1** *Tubo hierro cuadrado.* El tubo de hierro cuadrado es un elemento de soporte o base del módulo de pruebas, cuyas características se detalla en la tabla 4.

Tabla 4. Características del tubo hierro cuadrado


	<b>Elemento</b>	<b>Material</b>	Hierro
		<b>Dimensión</b>	1 ½" o 40mm
		<b>Espesor</b>	4mm
		<b>Largo</b>	6m
		<b>Peso</b>	1.20 Kg/m

Fuente: AUTOR

**3.4.2** *Descripción del motor eléctrico trifásico tipo jaula de ardilla.* El motor eléctrico trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla que conforma el módulo de pruebas, suministra la potencia requerida para el correcto funcionamiento de la bomba del sistema, la misma que presenta las siguientes características de la tabla 5.

El proceso de selección del motor se realizó en función a la bomba de eje libre que por la condición el eje nos permite realizar la evolución del modo de fallo de desalineación en paralelo del elemento conductor motor trifásico asíncrono jaula de ardilla.


Tabla 5. Características del motor eléctrico trifásico tipo jaula de ardilla

	<b>Marca</b>	<b>WEG</b>
	<b>Modelo</b>	TE1BFOXO
	<b>Potencia</b>	2 HP
	<b>Voltaje</b>	220/380/440 V
	<b>Amperaje</b>	6.8/3.5/3.04 A
	<b>Temperatura ambiente</b>	40°C
	<b>Eficiencia nominal</b>	82%
	<b>Factor de potencia</b>	0.79

Fuente: MANUAL WEG MOTORES ELÉCTRICOS

**3.4.3** *Tablero de control eléctrico.* El tablero de control eléctrico que se observa en la tabla 6, es una caja que contiene los dispositivos de conexión, maniobra, mando y protección que permiten el normal funcionamiento del motor una vez energizado.


Tabla 6. Características del tablero de control eléctrico

<b>Tamaño</b>	50x 75 x 25 mm	
<b>Color</b>	Crema	
<b>Material</b>	Metal	

Fuente: AUTOR

**3.4.4** *Descripción del interruptor eléctrico.* El interruptor eléctrico que se observa en la figura 20, es un aparato capaz de interrumpir o abrir el circuito eléctrico cuando por el circula un exceso de corriente eléctrica o cortocircuito. La característica principal del interruptor eléctrico es evitar daños en los equipos, cuyas características se encuentran detalladas en la tabla 7. La forma de accionamiento del interruptor es manual.


Tabla 7. Características del interruptor eléctrico

<b>Marca</b>	CNC	
<b>Número de modelo</b>	YCL7-63	
<b>Dimensiones</b>	54x77	
<b>Corriente</b>	30 A	
<b>Espesor aislación mm</b>	1-63 <sup>a</sup>	
<b>Tensión</b>	230/400v	

Fuente: ELECTROTELECOM

**3.4.5** *Descripción del contactor.* El contactor es un dispositivo que impide el paso de corriente eléctrica del circuito, tan pronto se de tensión a la bobina. Las características de este elemento se detallan en la tabla 8.


Tabla 8. Características del contactor

	<b>Fabricante</b>	LS
	<b>Serie/Modelo</b>	Metasol
	<b>Control</b>	CA o CC
	<b>Contacto principal</b>	3 polos MC-9b
	<b>Voltaje de bobina</b>	220 VAC
	<b>Corriente</b>	9A
	<b>Contactos auxiliares</b>	1NO+ 1NI

Fuente: ELECTROTELECOM

**3.4.6** *Descripción del relé térmico.* El relé térmico que se observa en la tabla 9, protege al motor contra las sobrecargas débiles y prolongadas, optimizando la durabilidad y continuidad de trabajo del equipo.

Tabla 9. Características del relé térmico

<b>Marca</b>	STECK	
<b>Modelo</b>	S-D225Z1G	
<b>Ui</b>	660V	
<b>Clase de disparo</b>	10 A	
<b>Contacto auxiliar</b>	AC-15	
<b>Ue</b>	230V / 400V	
<b>Ie</b>	1.57A / 0,9A	


Fuente: ELECTROTELECOM

**3.4.7** *Descripción del cable eléctrico.* Este cable es un conductor unifilar de cobre recubierto de un material aislante o protector.

Se emplea para realizar las conexiones eléctricas entre los diferentes componentes del tablero de control y el motor, cuyas características se observan en la tabla 10.

Se realizó el cálculo del calibre del conductor para cada caso en donde se determinó que se debe utilizare el conductor número 14 para el circuito de mando.


Tabla 10. Características del cable eléctrico

<b>Color</b>	Negro, azul, amarillo y rojo	<b>Elemento</b> 
<b>Calibre #</b>	14	
<b>Voltaje</b>	0-220V AC y DC	
<b>Longitud utilizada</b>	4m	
<b>Estructura</b>	1 cable de cobre y aislante termoplástico	

Fuente: ELECTROTELECOM

**3.4.8** *Cable flexible.* Este conductor multipolares que sirven para la alimentación de equipos para el funcionamiento del módulo de pruebas, en su estructura el conductor es de cobre y aislante termoplástico PVC, trabaja hasta temperatura máxima de 60°C, como indica la tabla 11.


Tabla 11. Características del cable flexible

<b>Elemento</b> 	<b>Calibre</b>	3x14
	<b>Espesor de aislamiento</b>	1,14 mm
	<b>Sección</b>	2,08 mm <sup>2</sup>
	<b>Diámetro exterior</b>	11,8 mm
	<b>Capacidad de corriente para un conductor al aire libre</b>	15 A
	<b>Temperatura máxima de trabajo</b>	60 °C

Fuente: ELECTROTELECOM

**3.4.9** *Conector macho.* El conector macho o enchufe permite el paso de corriente al circuito eléctrico para el normal funcionamiento del módulo de pruebas, con las siguientes características que se indica en la tabla 12.


Tabla 12. Características del conector macho

<b>Elemento</b> 	<b>Intensidad</b>	15 a 20 A
	<b>Voltaje</b>	125 V
	<b>Descripción</b>	Enchufe blindado de tres patas

Fuente: ELECTROTELECOM

**3.4.10 Focos.** El foco es una lámpara incandescente compactada que proporciona un flujo luminoso y sirve en especial para crear un consumo en una de las fases del motor para alcanzar el objetivo de este proyecto, presentando las siguientes características que se indica en la tabla 13.

Tabla 13. Características del foco


<b>Elemento</b> 	<b>Tipo</b>	Incandescente
	<b>Potencia</b>	200 W
	<b>Energía luminosa</b>	48.87 %

Fuente: ELECTROTELECOM

**3.4.11 Bomba centrífuga.** La bomba centrífuga del módulo de pruebas permite recircular el agua a través del sistema.

Para el funcionamiento se establecen bajo condiciones y parámetros requeridos para la evolución de los modos de fallos lo cual permite tomar los datos de la evolución de los modos de fallos tanto de desalineación como de desequilibrio de tensiones, que se generan para el desarrollo de los objetivos. Las características de la bomba se detallan en la tabla 14.

Tabla 14. Características de la bomba centrífuga


<b>Marca</b>	BARNES	<b>Elemento</b> 
<b>Modelo</b>	HU2	
<b>Tipo de bomba</b>	Centrífuga	
<b>Acoplamiento</b>	Universal	
<b>Temp. Máx. líquido</b>	70°C	
<b>Peso</b>	30 Kg	
<b>Caudal</b>	78 GPM	
<b>φ Succión y Descarga</b>	2" NPT	

Fuente: MANUAL DE BOMBAS DE AGUA BARNES



**3.4.12 Tubería.** La tubería de agua presenta las características de la tabla 15, cuya función primordial es transportar el líquido a través del sistema, el diámetro de esta tubería está determinada según las bocas DN1 y DN2 del manual de la bomba centrífuga.

Tabla 15. Características de la tubería

<b>Material</b>	PVC	
<b>Diámetro tubería de succión</b>	2"	
<b>Diámetro tubería de descarga</b>	2"	
<b>Largo</b>	4m	
<b>Presión operacional</b>	200 PSI	

Fuente: AUTOR

**3.4.13 Válvula tipo compuerta.** Esta válvula regula los líquidos generando una caída de presión dentro del sistema, realizando un cierre hermético y controlado.


Tabla 16. Características de la válvula tipo compuerta

	<b>Marca</b>	PAOLO
	<b>Presión</b>	200 PSI
	<b>Material</b>	Aleado de bronce
	<b>Diámetro</b>	2 1/2"

Fuente: AUTOR

**3.4.14 Acople tipo araña.** El acople tipo araña o cruceta transmite potencias pequeñas a una velocidad alta desde velocidades moderadas, con muy poca capacidad de desalineación, efectiva para cumplir el objetivo de la investigación, sus características se observan en la tabla 17.

Tabla 17. Características del acople tipo araña


	<b>Marca</b>	SKF
	<b>Material</b>	Acero
	<b>Diámetro</b>	5.4 cm
	<b>Torque</b>	2"

Fuente: AUTOR



**3.4.15** *Universal.* Este universal de dos ejes es un accesorio que sirve para la unión de dos segmentos de tubería situadas a sus extremos, con las siguientes características de la tabla 18.


Tabla 18. Características del universal

<b>Material</b>	PVC	
<b>Diámetro tubería de succión</b>	2"	
<b>Diámetro tubería de descarga</b>	2"	
<b>Color</b>	Marron	

Fuente: AUTOR

**3.4.16** *Acople para tanque.* El acople para tanque es un elemento que sirve para conectar la tubería de la bomba con el recipiente contenedor del líquido del sistema, con las características de la tabla 19.


Tabla 19. Características del acople para tanque

	<b>Marca</b>	Plastigama
	<b>Material</b>	PVC
	<b>Diámetro tubería</b>	2 x 1 1/2"

Fuente: AUTOR

**3.4.17** *Codos.* Los codos realiza el cambio de dirección de la tubería del sistema a 45°, con las siguientes características de la tabla 20.

Tabla 20. Características de los codos


	<b>Marca</b>	Plastigama
	<b>Material</b>	PVC
	<b>Diámetro tubería</b>	2' X 1' 1/2
	<b>Angulo</b>	90°

Fuente: AUTOR

**3.4.18 Reducción campana.** El acople campana es un accesorio de forma cónica utilizado para disminuir el volumen del fluido a través de las líneas de tubería al manómetro de presión de agua que se observa en la tabla 21.

En el acople tipo manzana se instala el manómetro de presión


Tabla 21. Características de la reducción campana

<b>Elemento</b> 	<b>Material</b>	Hierro fundido
	<b>De rosca</b>	1/4"
	<b>Diámetro</b>	2' X 1' 1/2

Fuente: AUTOR

**3.4.19 Manómetro de presión de agua.** El manómetro o medidor de presión de agua que se observa en la tabla 22, sirve para controlar visualmente la presión con la que circula el fluido a través de sistema.

Tabla 22. Características del manómetro de presión del agua

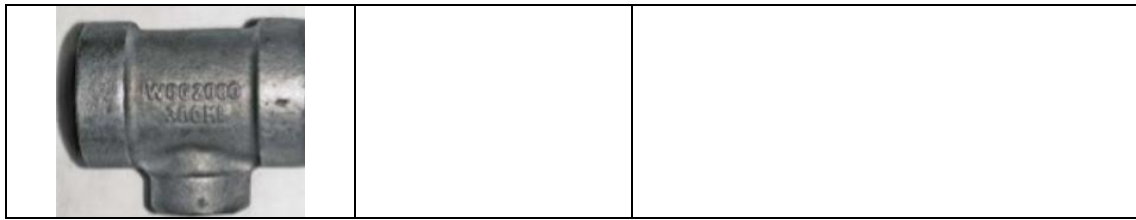
<b>Elemento</b> 	<b>Marca</b>	PAOLO
	<b>Presión</b>	200 PSI
	<b>De rosca</b>	1/4"
	<b>Cara</b>	2"

Fuente: AUTOR

**3.4.20 Acople tipo T.** El acople tipo T es una especie de empalme para tuberías mostrando sus características en la tabla 23. en el presente proyecto se acopla las tuberías y la campana.

Tabla 23. Características del acople tipo T

<b>Elemento</b>	<b>Material</b>	Acero galvanizado
	<b>Tipo</b>	Conector de 3 vías
	<b>Diámetro</b>	2' X 1' 1/2




Fuente: AUTOR

**3.4.21 Recipiente plástico.** El recipiente de agua que se muestra en la figura 24, es una caja plástica transparente que permite contener el fluido del sistema.

La selección se realizó a partir del análisis de la curva de la bomba del diámetro de succión, del diámetro de descarga, y la velocidad como es un sistema que recircula el líquido se instaló un tanque de 44 L.

Tabla 24. Características del recipiente plástico

Material	PVC	<b>Elemento</b> 
Color y forma	Transparente rectangular	
Dimensiones	45x33x30(cm)	

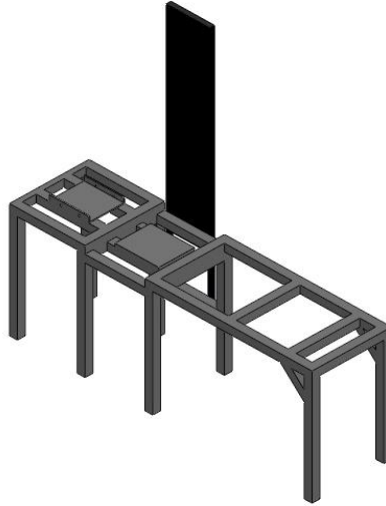
Fuente: AUTOR

### 3.5 Construcción del módulo de pruebas

#### 3.5.1 Procedimiento de la construcción del módulo de pruebas.

- Para la construcción del sistema mecánico, se realizó el corte del tubo de hierro cuadrado y la unión con soldadura eléctrica entre los tubos siguiendo el modelo determinado de la estructura metálica del módulo de pruebas.
- Se pintó con pintura anticorrosiva toda la estructura metálica, como se muestra en la figura 29.

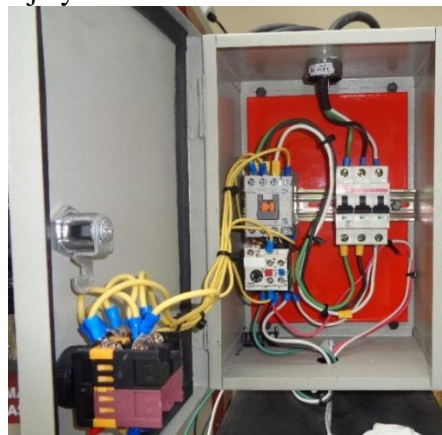
Figura 29. Estructura metálica



Fuente: AUTOR

- Se realizó la conexión eléctrica de todos los elementos en el tablero de control eléctrico y del módulo de pruebas, como se observa en la figura 30.
- La figura 30 permite identificar la conexión del circuito de potencia y el circuito de mando que se utiliza para realizar y control durante las pruebas que se realizan en el módulo.
- Se realizó las pruebas para la verificación del correcto funcionamiento del circuito.

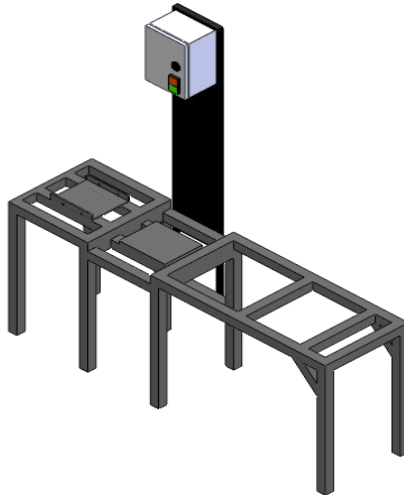
Figura 30. Montaje y conexión eléctrica en el tablero eléctrico



Fuente: AUTOR

- En la figura 31 se observa el montaje del tablero eléctrico en la estructura, esta sujetado con pernos.

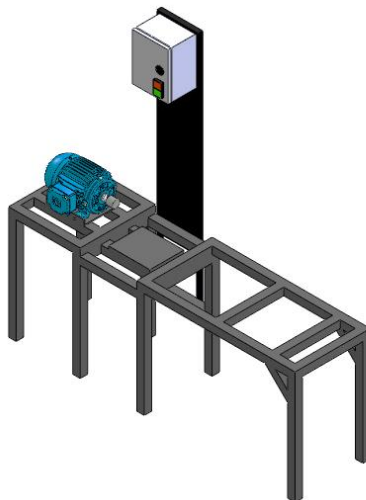
Figura 31. Montaje del tablero eléctrico



Fuente: AUTOR

- Se realizó el montaje del motor sobre la estructura metálica, como se observa en la figura 32.
- La estructura fue creada para poder realizar la evolución del modo de fallo de desalineación.

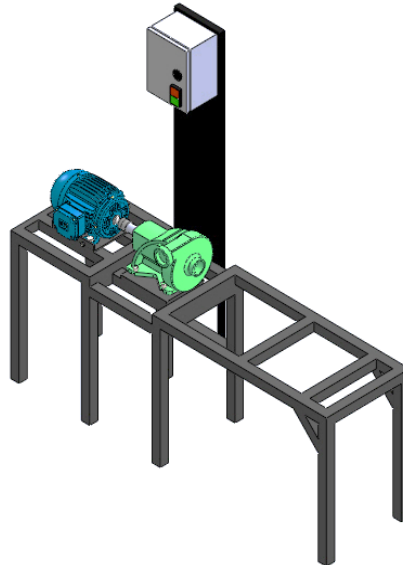
Figura 32. Montaje del motor sobre la estructura metálica



Fuente: AUTOR

- Se realizó el montaje y conexión de la bomba con el motor sobre la estructura metálica, como se observa en la figura 33. Para lo cual se consideró las dimensiones de la bomba y del motor.

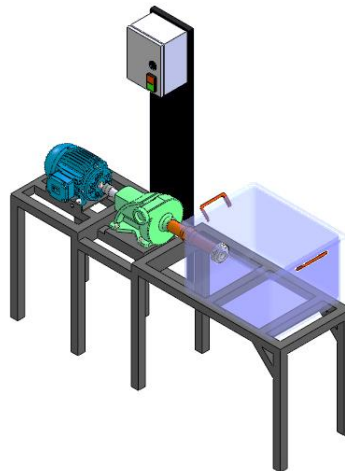
Figura 33. Montaje y conexión de la bomba con el motor



Fuente: AUTOR

- Se realizó la conexión de la bomba con el recipiente donde circulara y almacenara el líquido del sistema, como se observa en la figura 34.

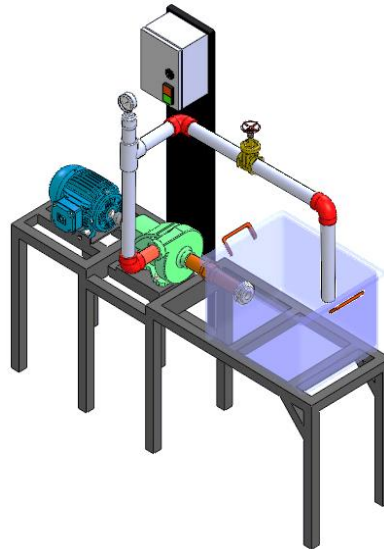
Figura 34. Conexión de la bomba con el recipiente



Fuente: AUTOR

- Finalmente antes de la conexión del sistema de succión y descarga del módulo de pruebas, con todos sus accesorios, se abrió la válvula para llenar manualmente la bomba centrífuga de líquido y se abrió las salidas de aire antes del cierre del sistema del módulo, como se indica en la figura 35.

Figura 35. Conexión del sistema de succión y descarga del módulo de pruebas



Fuente: AUTOR

### 3.6 Pruebas de operación

**3.6.1** *Prueba de operación del módulo de pruebas.* La verificación de la operación correcta del módulo de pruebas se realizó de la siguiente manera:

- Primero se instaló el protector del acoplamiento flexible.
- Luego se abrió completamente la válvula y llenó la línea de aspiración de la bomba.
- Se conectaron los equipos de inspección de termografía y análisis energético sobre el módulo de pruebas.
- Se conectó a la alimentación de 220 V AC para energizar el motor.
- Luego se accionó el interruptor en encendido del tablero del módulo de pruebas.
- Se verificó que no existan fugas en la bomba, tubería de succión y descarga, para evitar fugas y pérdidas de presión, verificando constantemente en el manómetro la presión requerida.
- Cada 30 y 15 minutos se realizó la verificación del aumento de temperatura tanto en los acoplamientos como en los equipos del motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla y de la bomba centrífuga.
- Finalmente se verificó el registro de los equipos de inspección.

## CAPÍTULO IV

### 4. MEDICIONES

#### 4.1 Análisis de la aparición de los modos de fallos en el motor eléctrico

Antes de presentar la tabulación de los datos de la desalineación en paralelo y desequilibrio de tensiones se realizó el análisis de modos de fallos y efectos en motores eléctricos de una manera en general, presentada en el anexo A.

**4.1.1** *Creación del modo de fallo en paralelo.* Una vez que se finalizan las pruebas necesarias del módulo se procedió a generar el modo de fallo desalineación en paralelo en la base que se construyó con cuatro pernos ubicados respectivamente en los soportes del motor, el paso de los pernos es milimétrico a medida que se gira 45 grados el perno ejerce una fuerza sobre el motor hacia el sentido en que se giró dando como resultado una desalineación al motor en 0.25mm. La evolución del modo de fallo se generó hasta alcanzar 1mm de desalineación permitiendo observar mediante termografía el incremento de temperatura

La creación del modo de fallo desequilibrio energético se realizó en dos de las tres líneas del circuito de potencia de alimentación del motor conectando consumidores que desequilibren el circuito en 400W para el primer caso, y para la evolución del modo de fallo se conectó un consumidor de 800W.

**4.1.2** *Mantenimiento del módulo de pruebas.* Para la conservación del módulo de pruebas es necesario establecer las operaciones de mantenimiento con sus respectivas frecuencias de mantenimiento, partiendo de su contexto operacional se toma en cuenta que su funcionamiento no es continuo ya que son equipos para el laboratorio.

La mayoría de las tareas serán programadas para realizarse de forma semestral y en horas de elaboración de prácticas de los estudiantes, En la tabla 26 se detalla las tareas a realizar del módulo de pruebas las cuales permitirán que el modulo alcance las condiciones requeridas de los diferentes sistemas para la realización de las practicas.



Tabla 25. Banco de tareas de mantenimiento del módulo de pruebas

	<b>BANCO DE TAREAS DE MANTENIMIENTO POR EQUIPOS</b>	
	ESPOCH - FACULTAD DE MECÁNICA	
<b>Versión: 2016</b>	SECCIÓN: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	
<b>EQUIPO O MÁQUINA</b>	<b>APLICA A:</b>	
Módulo de pruebas	FAME-MP-MP01	
<b>TAREA DE MANTENIMIENTO</b>	<b>FRECUENCIA</b>	
INSPECCIÓN DE CONEXIONES ELÉCTRICAS	Semestral	
INSPECCIÓN DEL MOTOR TRIFÁSICO ASÍNCRONO TIPO JAULA DE ARDILLA	Semestral	
INSPECCIÓN DEL CABLE DE ALIMENTACIÓN	Semestral	
INSPECCIÓN DE LA BOMBA CENTRIFUGA	Semestral	
CAMBIO DE RODAMIENTOS	3 a 5 años(manual de operación)	
INSPECCIÓN DEL VENTILADOR	Semestral	
LIMPIEZA DEL VENTILADOR	Semestral	
INSPECCIÓN DE SELLO MECÁNICOS	Semestral	
INSPECCIÓN DE LAS CAMISAS DEL EJE	Semestral	
PURGADO DE LA BOMBA	Semestral	
INSPECCIÓN DE LAS LÍNEAS DE SUCCIÓN Y DESCARGA DE LA BOMBA	Semestral	
INSPECCIÓN DE LA VÁLVULA	Semestral	
LUBRICACIÓN DEL MOTOR	Semestral	
INSPECCIÓN Y LIMPIEZA GENERAL DEL EQUIPO	Trimestral	

Fuente: AUTOR

#### 4.2 Toma y tabulación de datos de la desalineación en paralelo del motor trifásico jaula de ardilla

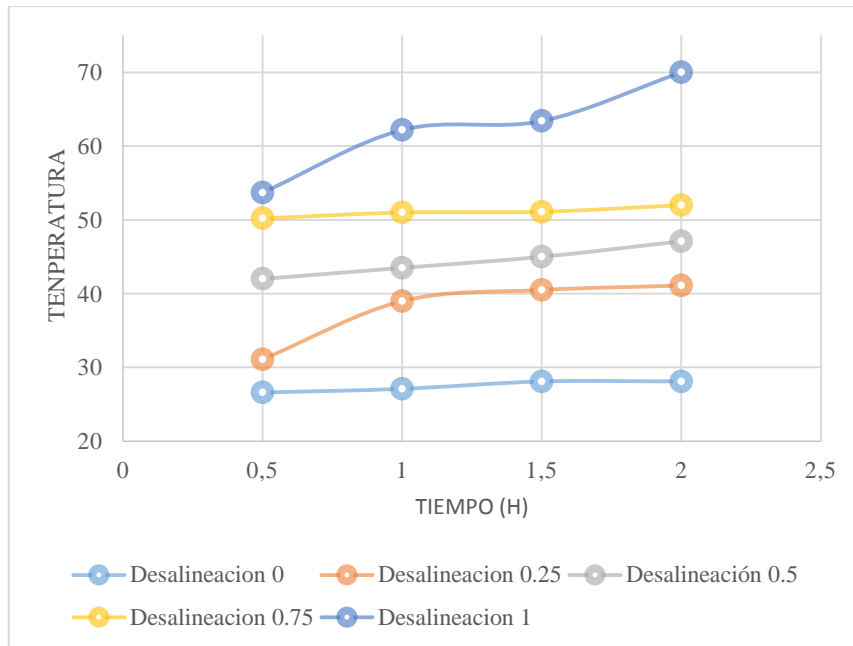
Los datos fueron tomados en periodos de tiempo de 30 minutos a medida que el fallo evoluciona para luego pasar a realizar la tabulación de cada periodo de tiempo a medida que el fallo evoluciona. Con la utilización de la cámara termográfica se procedió a tomar los termogramas cuando el motor no tiene fallo, para luego comparar con los termogramas y los valores que se tabulan el **Anexo B**. Los valores obtenidos fueron analizados y

comprados cuando el fallo ha evolucionado desde 0.25mm 1mm durante un periodo de tiempo de 10 horas.

#### **4.3 Análisis del incremento de temperatura en función al tiempo de la evolución del modo de fallo desalineación en paralelo.**

Los datos obtenidos de temperatura en la Anexo B están determinados en función a la desalineación del motor para lo cual se realiza una serie de termogramas los cuales son analizados en el programa Flir tolos. El análisis en el software permite identificar los valores reales de temperatura que el motor está expuesto durante la evolución de los modos de fallos que se generan para la evaluación energética. El parámetro de temperatura del Anexo B permite identificar el incremento de temperatura durante los periodos de tiempo que se realiza la termografía para los diferentes eventos que se producen cuando un modo de fallo evoluciona. Para el análisis de la investigación se realizaron varios termogramas durante cuatro horas las mismas que dan como resultado la sustentación para continuar con análisis observando la tendencia de las curvas que se generan mediante la representación gráfica. Los valores de temperatura cuando el sistema trabajo con el fallo y se determina que la severidad del fallo no incrementa mientras se mantenga el fallo de 0.25mm, 0.50mm, 0.75mm, lo que no sucede cuando el fallo ha evolucionado hasta 1mm. Como se representa en figura 36,

Figura 36. Incremento de temperatura en función a del tiempo



Fuente: AUTOR

#### 4.4 Modelo matemático para el análisis de la pérdida energética que se manifiesta en forma de calor.

Según los resultados obtenidos de las mediciones para el análisis de las pérdidas energéticas considerando el incremento de temperatura con relación a las pérdidas energéticas en KW/h según cuatro tiempos, se obtienen el siguiente modelo matemático para determinar el incremento de temperatura generado:

$$\Delta T = T_{CON\ DESALINEACIÓN} - T_{I\ SIN\ DESALINEACIÓN}$$

Donde:

$\Delta T$ = Incremento de temperatura en °C.

$T_{CON\ DESALINEACIÓN}$ = Temperatura final máxima con desalineación paralela medida.

$T_{I\ SIN\ DESALINEACIÓN}$ = Temperatura inicial sin desalineación paralela medida.

Las fuerzas resultantes de la desalineación generan un incremento de 4,5 °C de temperatura del equipo aumentándose progresivamente hasta los 43, 4 °C.

La última toma realizada después de 8 horas de trabajo, la cual se detalla en la tabla 26, este tipo de falla en el motor puede dañar al mismo motor y a otros equipos cercanos.

Tabla 26. Datos del incremento de temperatura de la desalineación en paralelo del motor trifásico jaula de ardilla

<b>DESALIENACIÓN (mm)</b>	<b><math>\Delta T(^{\circ}C)</math></b>
0	0
0,25	4,5
0,5	15,4
0,75	23,6
1	27
1	43

Fuente: AUTOR

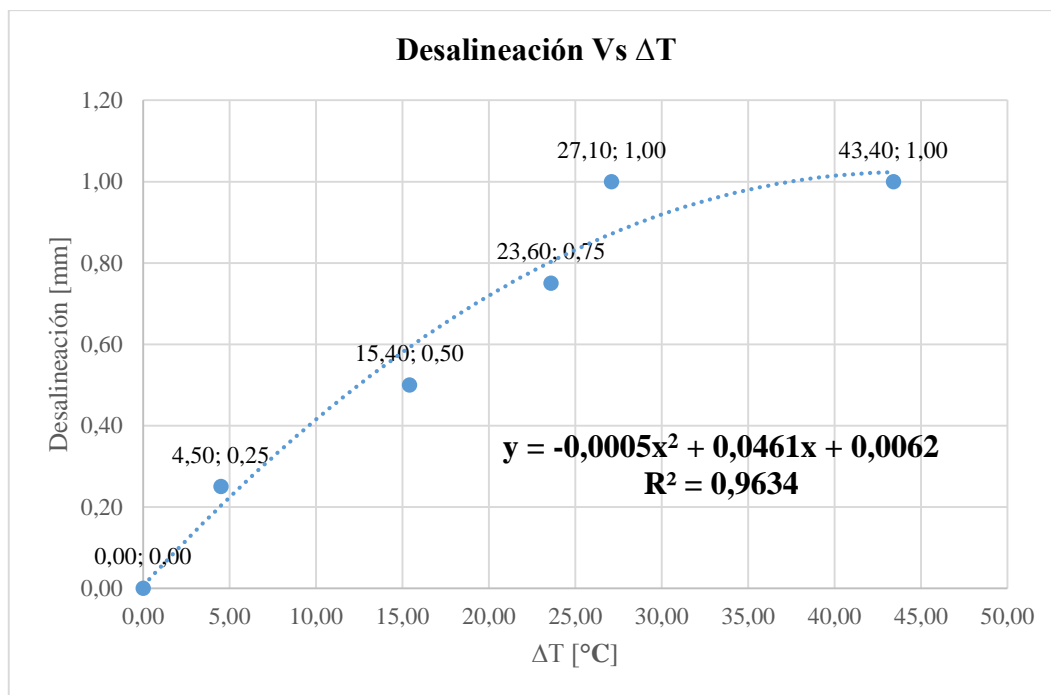
El incremento de temperatura producido por la variación de la desalineación en paralelo de 0,25 mm, 0,5 mm, 0,75 mm y 1 mm del equipo cada 30 minutos, se proyecta en la Anexo B.

Mediante la tabulación de los datos se determinó una mayor criticidad con aumento de calor a medida que incrementa la desalineación en paralelo según el tiempo de trabajo del equipo.

Para construir la gráfica representativa del incremento de la temperatura con desalineación en paralelo se utiliza los datos del Anexo B, que se obtiene luego del análisis termográfico el cual fue relacionando con la fórmula del incremento de temperatura.

Para el análisis se realiza la comparación de los termogramas con desalineación y cuando el motor no está desalineado.

Figura 37. Incremento de temperatura con desalineación en paralelo



Fuente: AUTOR

#### 4.5 Regresión para el modelo cuadrático

Con los datos obtenidos de la tabla de desalineación en paralelo se realizó la regresión para la determinación de la fórmula que es de la forma cuadrática. La regresión se refiere al cálculo de tendencia de datos utilizando regresiones a través del cálculo de método de mínimos cuadrados el  $R^2$  y sus errores. La regresión demuestra un resultado de aproximaciones que los datos de desalineación se aproximan a la curva más probable y la ecuación de comportamiento de la misma.

Donde  $n = 6$

$n$  = número de datos de la tabla 6.

$$\sum Y_i = na + b \sum X_i + c \sum X_i^2$$

$$\sum X_i Y_i = a \sum X_i + b \sum X_i^2 + c \sum X_i^3$$

$$\sum X_i^2 Y_i = a \sum X_i^2 + b \sum X_i^3 + c \sum X_i^4$$

Tabla 27. Regresión cuadrática del incremento de temperatura-desalineación

MODELO CUADRATICO									
$X_i$	$Y_i$	$X_i Y_i$	$X_i^2$	$X_i^2 Y_i$	$X_i^3$	$X_i^4$	$Y'$	$e_i = Y_i - Y'$	$e_i^2$
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,006182	- 0,006182	0,000038
4,50	0,25	1,13	20,25	5,06	91,13	410,06	0,203106	0,046894	0,002199
15,40	0,50	7,70	237,16	118,58	3652,26	56244,87	0,592365	- 0,092365	0,008531
23,60	0,75	17,70	556,96	417,72	13144,26	310204,44	0,803343	- 0,053343	0,002845
27,10	1,00	27,10	734,41	734,41	19902,51	539358,05	0,871991	0,128009	0,016386
43,40	1,00	43,40	1883,56	1883,56	81746,50	3547798,27	1,023012	- 0,023012	0,000530
$\Sigma X_i$	$\Sigma Y_i$	$\Sigma X_i Y_i$	$\Sigma X_i^2$	$\Sigma X_i^2 Y_i$	$\Sigma X_i^3$	$\Sigma X_i^4$	$\Sigma Y'$	$\Sigma e_i$	$\Sigma e_i^2$
114,00	3,50	97,03	3432,34	3159,33	118536,6	4454015,6	3,500000	0,000000	<b>0,0305298</b>

Fuente: AUTOR

Luego se determina el valor de a, b, c, y.

Tabla 28. Determinación de los valores

<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>y</b>
6,00	114,00	3432,34	3,5
114,00	3432,34	118536,66	97,025

Tabla 28. (Continuación)

3432,34	118536,66	4454015,69	3159,3325
---------	-----------	------------	-----------

Fuente: AUTOR

Tabla 29. Resolución de la matriz inversa

Matriz Inversa			Variables	Resultado
0,663656486	-0,0541438	0,00092953	<b>a=</b>	0,00618199
-0,05414382	0,00801864	-0,0001716	<b>b=</b>	0,04611287
0,000929528	-0,0001716	4,0772E-06	<b>c=</b>	-0,0005226

Fuente: AUTOR

Luego se determina el valor del coeficiente de correlación de  $R^2 = 0,9634 \approx 1$

Este resultado indica que el 96,32 % de la incertidumbre inicial se resolvió con el modelo, entonces se determina que el ajuste de la ecuación es el más adecuado para los datos obtenidos de los termogramas.

#### **4.6 Modelo matemático para el análisis del consumo de energía por la evolución de la desalineación en paralelo.**

Para determinar el consumo de energía se considera un factor de potencial inicial a otro final con los datos obtenidos de los termogramas.

Los datos de la energía consumida de la tabla 27, facilitan el cálculo para determinar la pérdida energética que se produce en la desalineación en paralelo durante la evolución de los modos de fallos que se relacionan a un periodo de tiempo para cada caso. Mediante la utilización de los datos del consumo energético de la tabla 27, de análisis de evolución de los modos de fallo por desalineación, se establece la fórmula para el incremento del consumo energético.

$$\Delta E = (E_F - E_i)$$

$$\Delta Ec = (E_F - E_i) * t$$

Donde:

$\Delta E$ = Incremento del consumo energético en Kw

$E_i$ = Energía inicial.

$E_F$ = Energía final consumida.

El incremento de consumo energético que se proyectan en la figura 38, de los datos obtenidos de la tabla 30, relaciona la energía final consumida con desalineación en paralelo del equipo durante un tiempo determinado en este caso cada 30 minutos con la energía inicial consumida sin desalineación.

Demostrando el incremento de pérdidas energéticas con relación a las condiciones y tiempo de trabajo del equipo, siendo nuestro punto de referencia para detectar la falla a partir de transcurrido los 210 minutos con una desalineación de 0.0025mm donde presenta una variación de 0,004 kW de potencia.

La potencia consumida genera un aumento considerable de corriente eléctrica que podría causar daños en el embobinado del motor por alto amperaje. El fallo sería más drástico a medida que presenta mayor desalineación a mayor tiempo de trabajo lo cual disminuye la eficiencia del motor.

En la tabla 26 se determinan que los valores de la temperatura no varían ya que en el primer periodo de tiempo aún no se realiza ningún modo de fallo.

La evolución del modo de fallo de desalineación permite identificar el incremento de temperatura utilizando la cámara termográfica obteniendo el Termograma que luego será analizado y se determine que la tempera se eleva hasta un punto, el cual se mantiene si la desalineación no incrementa. A medida que el fallo evoluciona la temperatura se eleva. En el caso en que el fallo continúe el motor llegara al final de su vida útil.

Tabla 30. Datos del incremento del consumo energético de la evolución del modo de fallo de desalineación en paralelo en el motor trifásico jaula de ardilla.

<b>Desalineación (mm)</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Potencia</b>	<b><math>\Delta</math> Potencia</b>	<b><math>\Delta</math> Energía Consumida</b>
0	0,5	2,20	-	-
0	1	2,20	- 0,00	-
0	1,5	2,20	- 0,00	-
0	2	2,20	- 0,00	-

Tabla 30. (Continuación)

0,25	2,5	2,20	- 0,00	-
0,25	3	2,20	- 0,00	-
0,25	3,5	2,21	0,01	0,034
0,25	4	2,21	0,01	0,052
0,5	4,5	2,21	0,01	0,057
0,5	5	2,21	0,01	0,054
0,5	5,5	2,21	0,01	0,080
0,5	6	2,21	0,02	0,100
0,75	6,5	2,22	0,02	0,112
0,75	7	2,22	0,02	0,141
0,75	7,5	2,22	0,02	0,153
0,75	8	2,22	0,02	0,156
1	8,5	2,22	0,02	0,173

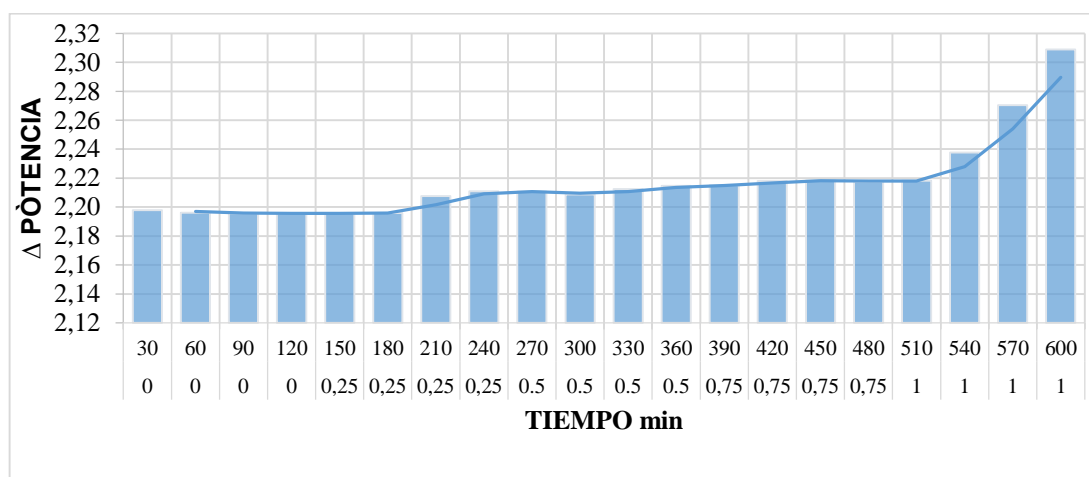


1	9	2,24	0,04	0,359
---	---	------	------	-------

Fuente: AUTOR

En la tabla 30, se presenta el cálculo de la energía consumida por la evolución del modo de fallo y el incremento del tiempo lo cual da como resultado que la energía perdida incrementa en función del desalineamiento y el tiempo. Para el cálculo del costo se considera la fórmula del incremento de la energía, que forma parte para la determinación del valor en dólares de la energía que se pierde cuando el fallo por desalineación en paralelo evoluciona con el tiempo. El resultado es la suma de los costos de la evolución del fallo, que es un valor de \$0,42 en 8 horas de funcionamiento.

Figura 38. Incremento de temperatura con desalineación en paralelo en el motor trifásico jaula de ardilla.



Fuente: AUTOR

#### 4.7 Tabulación de datos del desequilibrio de fases del motor trifásico jaula de ardilla

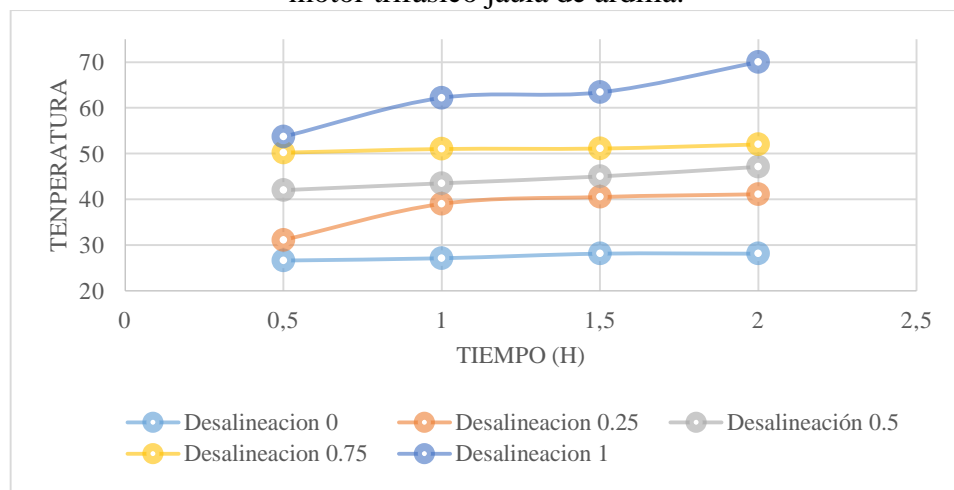
Los datos obtenidos de temperatura en la Anexo C están determinados en función al desequilibrio de fases del motor, realizando una serie de termogramas los cuales fueron analizados en el programa Flir tolos. El software permite identificar los valores reales de temperatura que el motor está expuesto durante la evolución de los modos de fallos que se generaron para la evaluación energética. El parámetro de temperatura del Anexo C permite identificar el incremento de temperatura durante los periodos de tiempo que se realiza la termografía para los diferentes eventos que se producen cuando un modo

de fallo evoluciona con un desequilibrio de 400W, y 800W. Para el análisis de la investigación se realizaron varios termogramas durante cuatro horas las mismas que dan como resultado la sustentación para continuar con análisis observando la tendencia de las curvas que se generan mediante la representación gráfica de los datos obtenidos a medida que el fallo no evoluciona.

#### 4.8 Análisis del incremento de temperatura en función al tiempo de la evolución del modo de fallo del desequilibrio de fases 400W, y 800W

Los datos de la Anexo C, de la temperatura máxima del motor permiten identificar los valores de temperatura que se incrementa en función a la evolución del modo de fallo de desequilibrio de las fases del motor trifásico tipo jaula de ardilla.

Figura 39. Incremento de temperatura modo de fallo desequilibrio de fases en el motor trifásico jaula de ardilla.



Fuente: AUTOR

La figura 39, se visualiza el incremento de temperatura debido a la evolución del modo de fallo y el tiempo que ha transcurrido para la realización de termografía en el módulo de pruebas.

#### **4.9 Modelo matemático en función a la temperatura para el análisis de la pérdida energética que se manifiesta en forma de calor a medida que el modo de fallo desequilibrio de Fases evoluciona.**

Los resultados obtenidos de las mediciones para el análisis de las pérdidas energéticas considerando el incremento de temperatura que se determina por medio del análisis termográfico, se relaciona a las pérdidas energéticas en KW/h según cuatro tiempos, se obtienen el siguiente modelo matemático para determinar el incremento de temperatura generado:

$$\Delta T = T_{II \text{ CON desequilibrio de fases}} - T_{I \text{ SIN desequilibrio de fases}}$$

Donde:

$\Delta T$ = Incremento de temperatura en °C.

T con desalineación= Temperatura final máxima con desequilibrio de fases.

T sin desalineación= Temperatura inicial sin desequilibrio de fases.

#### **4.10 Modelo matemático en función al consumo de energía para el análisis de la pérdida energética que se manifiesta en forma de calor a medida que el modo de fallo desequilibrio de Fases evoluciona.**

Para determinar el consumo de energía se consideró un factor potencial inicial a otro final según los datos obtenidos de las mediciones realizadas en cuatro pruebas a diferentes tiempos.

$$\Delta E = (E_F - E_i)$$

$$\Delta E_c = (E_F - E_i) * t$$

Donde:

$\Delta E$ = Incremento del consumo energético en KWh

$E_i$ = Energía inicial.

$E_f$ = Energía final consumida.

$t$  = tiempo

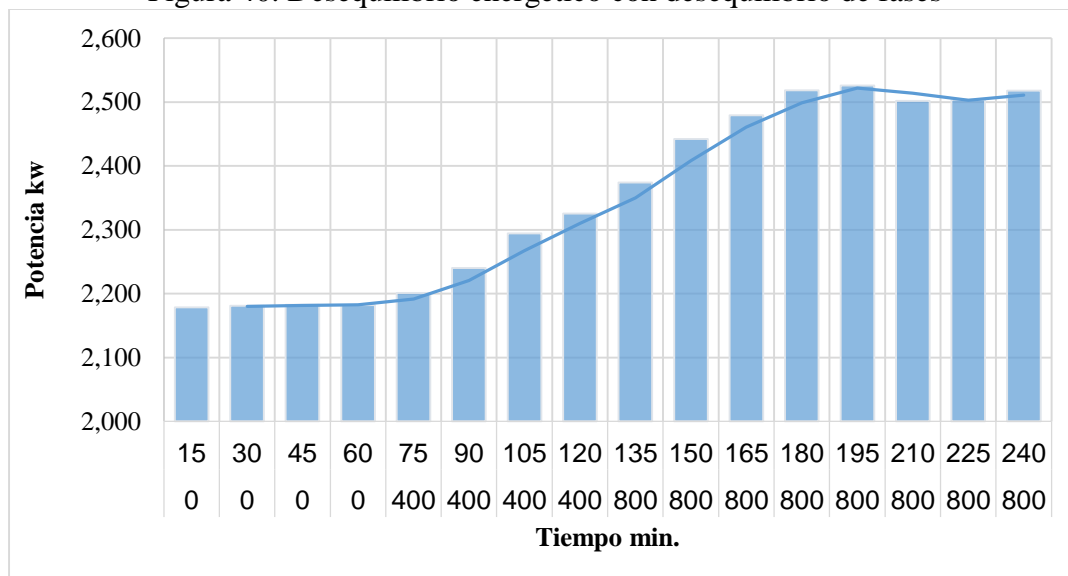
Tabla 31. Incremento del consumo energético con desequilibrio de fases

<b>D. F.(W)</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Potencia</b>	<b><math>\Delta</math> Potencia</b>	<b><math>\Delta</math> Consumo Energético</b>
0	0,25	2,179	0,000	0
0	0,5	2,181	0,002	0,001212
0	0,75	2,182	0,004	0,002728
0	1	2,182	0,004	0,003533
400	1,25	2,201	0,022	0,02782
400	1,5	2,240	0,061	0,092167
400	1,75	2,294	0,116	0,202262
400	2	2,326	0,147	0,293929
800	2,25	2,374	0,195	0,439813
800	2,5	2,443	0,264	0,659605
800	2,75	2,480	0,301	0,827572
800	3	2,518	0,340	1,019213
800	3,25	2,526	0,347	1,129026
800	3,5	2,502	0,323	1,131301
800	3,75	2,504	0,325	1,21893
800	4	2,518	0,339	1,35656

Fuente: AUTOR

El incremento de pérdidas energéticas del equipo producido por el desequilibrio de 400W y 800W en las fases como se indica en la tabla 34 proyectada en la figura 45, determinando el aumento proporcional de energía consumida según las condiciones y el tiempo de trabajo, donde el punto de referencia de falla del equipo en este proyecto es a partir de los 75 minutos de trabajo generando un incremento 0,022kW de potencia, el cual nos permite detectar que existe un desequilibrio en una de la líneas de alimentación del motor por su incremento de potencia.

Figura 40. Desequilibrio energético con desequilibrio de fases



Fuente: AUTOR

La figura 40, mediante el gráfico de barras representa que a medida que se incrementa el desequilibrio, tiempo se incrementa el consumo energético. En función a un patrón de referencia que son los puntos iniciales los cuales se establecen mediante la técnica de termografía y en función a las ecuaciones mencionadas de incremento de temperatura, incremento de consumo energético.

## CAPÍTULO V

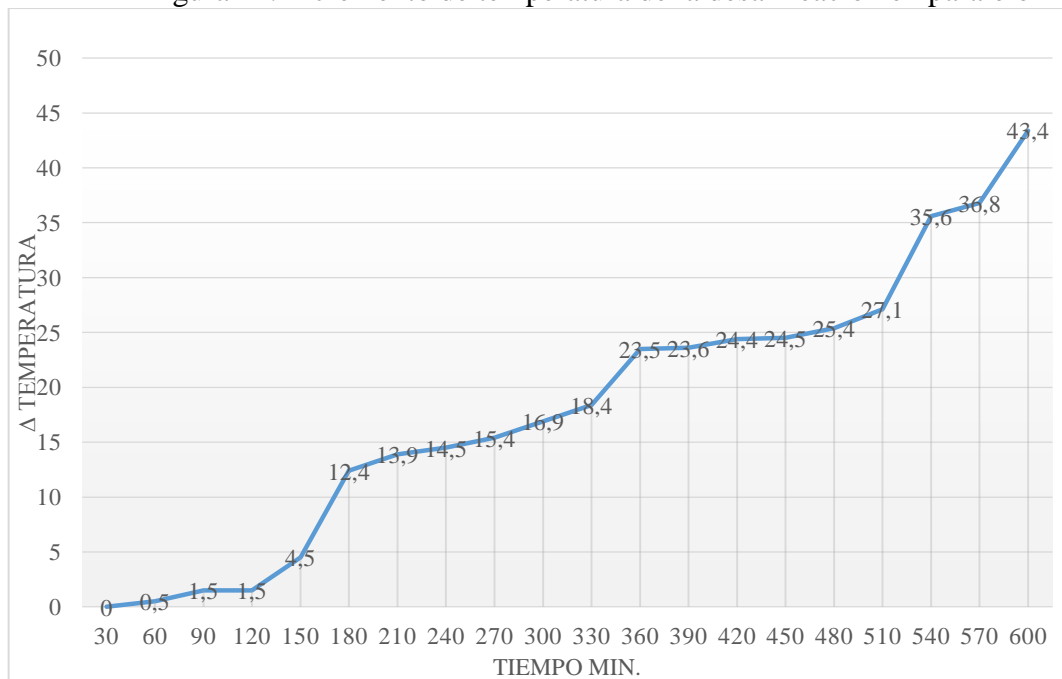
### 5. ANÁLISIS DE PÉRDIDAS ENERGÉTICAS

#### 5.1 Análisis de pérdidas energéticas de resultados del modo de fallo desalineación en paralelo

Cuando el motor tiene una desalineación en paralelo de 0,25 mm, el incremento de temperatura es de 2,5°C a 13,9°C presentando problemas de tipo medio donde la acción a tomar para su reparación es programable.

En la desalineación de 1mm la temperatura del equipo se eleva considerablemente de 27,1°C a 43,4°C donde el problema es de tipo severo y se requiere de una reparación inmediata antes que el daño sea severo, como se observa en la figura 41.

Figura 41. Incremento de temperatura de la desalineación en paralelo



Fuente: AUTOR

El incremento de consumo de energía que se observa en la tabla 30, es de 0,0034 kW a partir de la desalineación en paralelo de 0,25mm luego de los 210 min que el motor funcione bajo la condición de desalineación incrementando después de la desalineación

de 1 mm del motor, alcanzando la potencia de 1.109kW.

Los valores de la potencia consumida antes de los 210 min. Mediante el análisis de los datos del incremento de temperatura de la desalineación en paralelo del motor trifásico jaula de ardilla (tabla 30).

Mediante el análisis se establece que las condiciones de desalineamiento y durante el tiempo que se toma los datos no existe un consumo que sea considerable por lo cual según la norma NETA de termografía se determina que el equipo requiere inspecciones de mantenimiento.

Tabla 32. La evolución del modo de fallo relacionado con el incremento de temperatura.

<b>Desalineación (mm)</b>	<b>Tiempo(min)</b>	<b><math>\Delta T(^{\circ}C)</math></b>
0	30	0
0	60	0,5
0	90	1,5
0	120	1,5
0,25	150	4,5
0,25	180	12,4
0,25	210	13,9
0,25	240	14,5
0.5	270	15,4
0.5	300	16,9
0.5	330	18,4
0.5	360	23,5
0,75	390	23,6
0,75	420	24,4
0,75	450	24,5
0,75	480	25,4
1	510	27,1
1	540	35,6
1	570	36,8
1	600	43,4

Fuente: AUTOR

El punto de referencia para el análisis de falla del motor es a partir del incremento de potencia de 0,01W provocado por la desalineación en paralelo de 0,25 mm del motor y



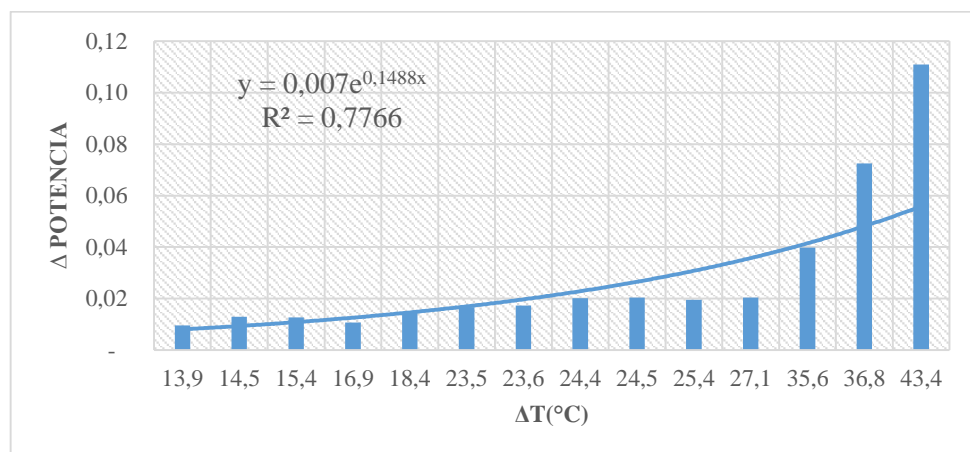
un aumento de temperatura de 13.9 °C; demostrándose que mientras mayor es la desalineación mayor es el incremento de temperatura por tanto eleva criticidad para el funcionamiento del equipo.

Tabla 33. Incremento de temperatura vs el incremento de potencia

<b>Desalineación</b>	<b>ΔT(°C)</b>	<b>Δ Potencia</b>
0,25	13,9	0,01
0,25	14,5	0,01
0,5	15,4	0,01
0,5	16,9	0,01
0,5	18,4	0,01
0,5	23,5	0,02
0,75	23,6	0,02
0,75	24,4	0,02
0,75	24,5	0,02
0,75	25,4	0,02
1	27,1	0,02
1	35,6	0,04
1	36,8	0,07
1	43,4	0,11

Fuente: AUTOR

Figura 42. Análisis del incremento de potencia del motor, relación incremento de temperatura desalienación en paralelo



Fuente: AUTOR

La ecuación para determinar las pérdidas energéticas cuando la temperatura en el motor

eléctrico ha incrementado se determinó con los datos obtenidos de la tabla aplicando la regresión para el ajuste de la curva que en este caso es una curva exponencial y el valor se lo puede determinar de forma gráfica o analítica.

Tabla 34. Costo de la energía perdida cuando existe un incremento de temperatura.

<b>Costo de energía Perdida</b>	<b><math>\Delta T(^{\circ}\text{C})</math></b>
0,004	13,9
0,007	14,5
0,007	15,4
0,007	16,9
0,010	18,4
0,013	23,5
0,015	23,6
0,018	24,4
0,020	24,5
0,020	25,4
0,023	27,1
0,047	35,6
0,089	36,8
0,144	43,4

Fuente: AUTOR

El costo de la energía que es desaprovechada cuando existe un incremento de temperatura por desalineación en paralelo está representado en la tabla 34.

La aplicación del método de linealización establece una ecuación exponencial que es la que más se ajusta la curva que generan los datos obtenidos, del incremento de temperatura y el costo que genera este incremento por el consumo de energía que se desaprovecha:

$$y = 0.001e^{0.1107X}$$

Donde:

y= costo de energía perdida.

e= log

$X$  = incremento de temperatura en grados centígrados.

Los valores numéricos corresponden a las constantes para el cálculo.

$$R^2 = 0,9752$$

El valor de  $R^2$  cuanto más cercano sea a uno representa que los valores que se calculen con la ecuación serán más acertados.

Calculo del costo de energía desaprovechada para un incremento de temperatura:

$$X = 27.1$$

$$y = 0.001e^{0.1107X}$$

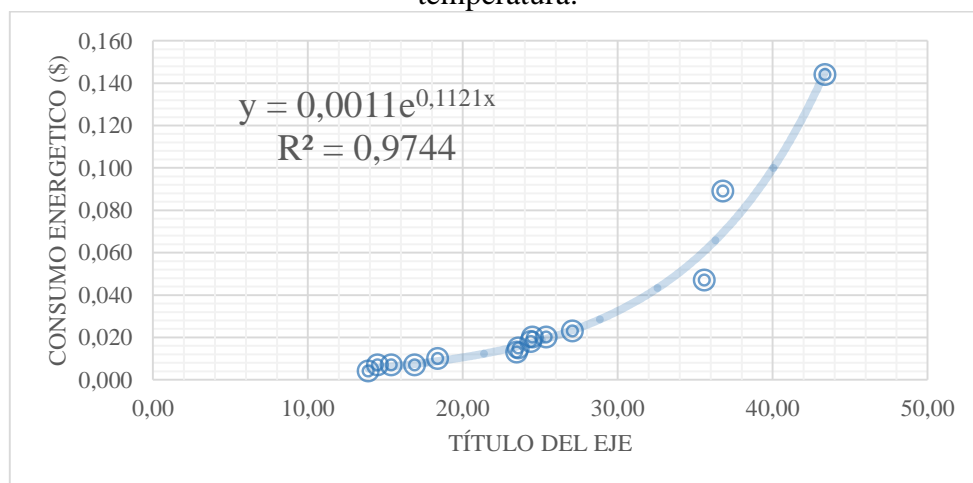
$$y = 0.001e^{0.1107 \cdot 27.1}$$

$$y = \$ 0.0227$$

El valor de  $y$  tiene un margen de error ya que el valor de  $R^2$  en la ecuación no es igual a uno pero para el caso de ajuste de curva se seleccionó el valor más cercano a uno.

La ecuación me permite determinar qué valor de dinero se paga por la energía que no se aprovecha en las instalaciones y esta disipada en forma de calor en la evolución del modo de fallo de desalineación en paralelo. El incremento de temperatura por desalineación incrementa el costo de energía que es desaprovechada.

Figura 43. Incremento del consumo energético relacionado con el incremento de temperatura.



Fuente: AUTOR

### 5.1.1 Regresión ecuación del consumo energético vs incremento de la temperatura.

Con los datos obtenidos de la tabla 34 de desalineación en paralelo se realizó la regresión para la determinación de la ecuación de ajuste.

La regresión se refiere al cálculo de tendencia de datos utilizando represiones atreves del cálculo de método de mínimos cuadrados el R2 y sus errores.

El resultado de aproximaciones de los datos de desalineación que se aproxima a la curva más probable y la ecuación de comportamiento de la misma. Donde n= 6

$$B = \frac{n(\sum XY^I) - (\sum X)(\sum Y^I)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} .$$

$$A^I = \bar{Y}^I - B\bar{X}$$

Tabla 35. Regresión modelo exponencial método de mínimos cuadrados

MODELO EXPONENCIAL		y=ae^bx		
$\Delta T(^{\circ}C)$	Costo de Energía Perdida			
			n=	14
$X_i$	$Y_i$	$Y'=\ln Y_i$	$X_i Y'$	$X_i^2$
13,90	0,004	2,63	36,58	193,21
14,50	0,007	2,67	38,78	210,25
15,40	0,007	2,73	42,11	237,16
16,90	0,007	2,83	47,78	285,61
18,40	0,010	2,91	53,59	338,56
23,50	0,013	3,16	74,19	552,25
23,60	0,015	3,16	74,61	556,96
24,40	0,018	3,19	77,95	595,36
24,50	0,020	3,20	78,37	600,25
25,40	0,020	3,23	82,16	645,16
27,10	0,023	3,30	89,42	734,41
35,60	0,047	3,57	127,18	1267,36
36,80	0,089	3,61	132,68	1354,24
43,40	0,144	3,77	163,64	1883,56
$\sum X_i$	$\sum Y_i$	$\sum Y'$	$\sum X_i Y'$	$\sum X_i^2$
343,40	0,42	43,97	1119,02	9454,34

Fuente: AUTOR

Tabla 36. Determinación de los valores

<b>b=</b>	0,1121
<b>a'=</b>	0,391358464
<b>a=</b>	1,1000E-03

Fuente: AUTOR

El resultado responde a la ecuación de:

$$y = ae^{bx}$$

Tabla 37. Calculo del costo de la energía perdida.

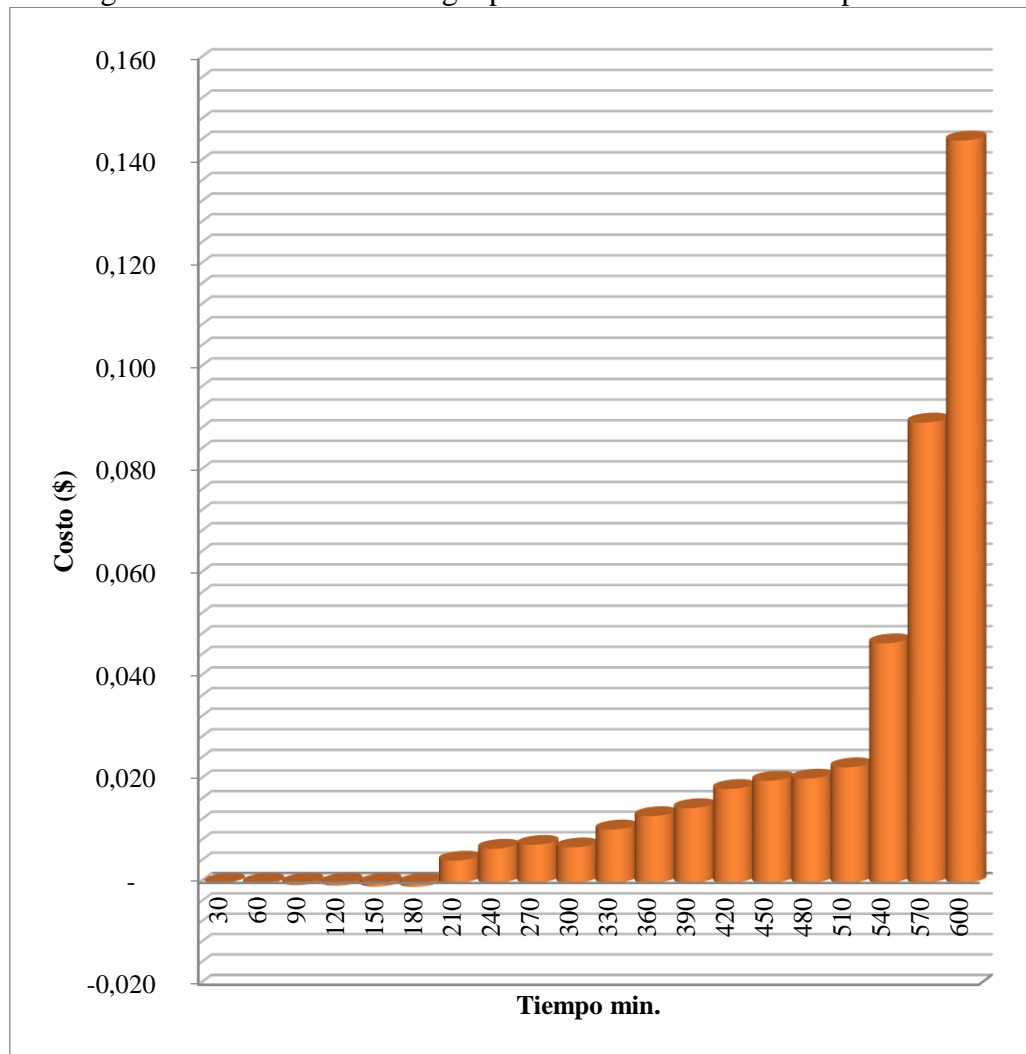
<b>Análisis del incremento del consumo energético</b>						
<b>Desalineación (mm)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Potencia</b>	<b>Δ Potencia</b>	<b>Δ Energía Consumida</b>	<b>Costo de energía Perdida</b>
0	30	0,5	2,20	-	-	-
0	60	1	2,20	0,00	- 0,002	-0,000
0	90	1,5	2,20	0,00	- 0,004	-0,000
0	120	2	2,20	0,00	- 0,004	-0,001
0,25	150	2,5	2,20	0,00	-0,006	-0,001
0,25	180	3	2,20	0,00	-0,006	-0,001
0,25	210	3,5	2,21	0,01	0,034	0,004
0,25	240	4	2,21	0,01	0,052	0,007
0,5	270	4,5	2,21	0,01	0,057	0,007
0,5	300	5	2,21	0,01	0,054	0,007
0,5	330	5,5	2,21	0,01	0,080	0,010
0,5	360	6	2,21	0,02	0,100	0,013
0,75	390	6,5	2,22	0,02	0,112	0,015
0,75	420	7	2,22	0,02	0,141	0,018
0,75	450	7,5	2,22	0,02	0,153	0,020
0,75	480	8	2,22	0,02	0,156	0,020
1	510	8,5	2,22	0,02	0,173	0,023
1	540	9	2,24	0,04	0,359	0,047
1	570	9,5	2,27	0,07	0,688	0,089
1	600	10	2,31	0,11	1,109	0,144
						<b>0,422</b>

Fuente: AUTOR

La energía desaprovechada en forma de calor cuando ha evolucionado un fallo a 1mm de desalineación en paralelo bajo condiciones de trabajo establecidas es de \$0.42 durante el tiempo de funcionamiento.

La grafica 44. Permite identificar que a medida que se incrementa el tiempo de funcionamiento con desalineación en paralelo y el fallo evoluciona se incrementa el costo de la energía que se pierde en forma de calor por los fallos que evolucionan en el motor.

Figura 44. Costo de la Energía perdida en función del tiempo



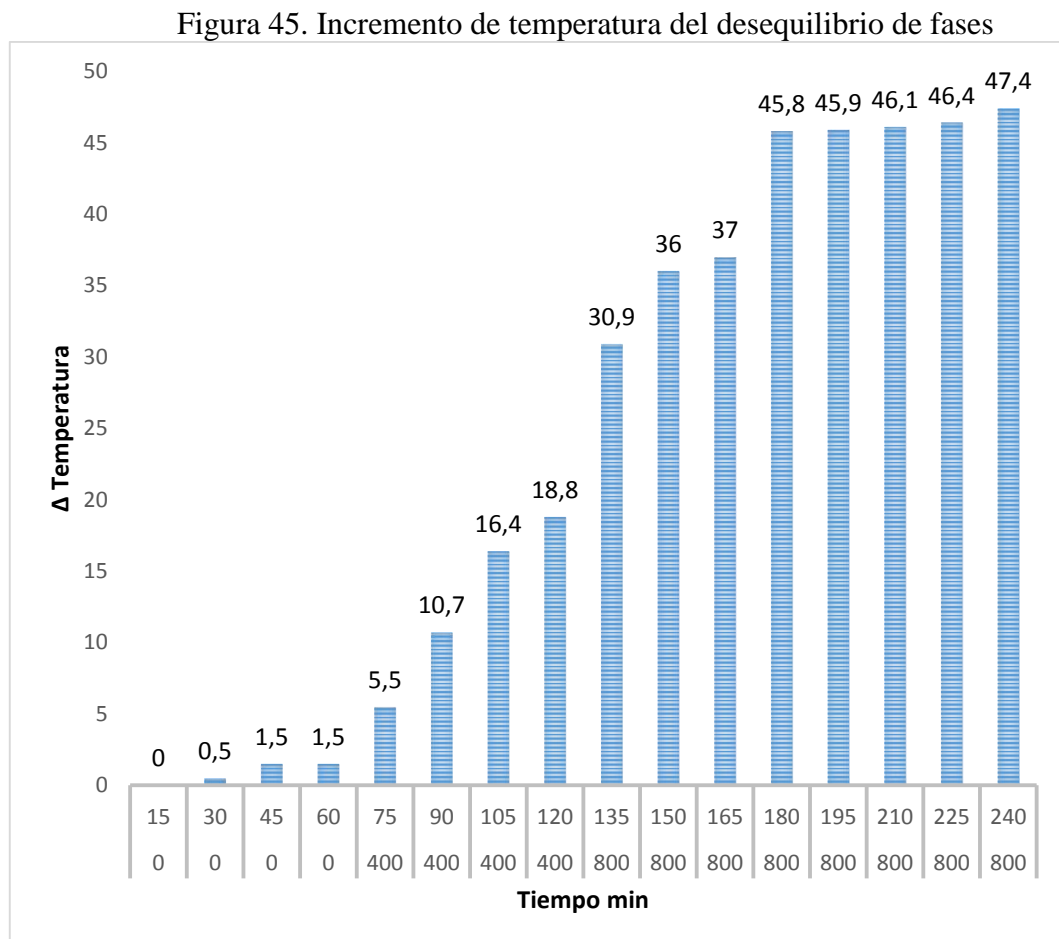
Fuente: AUTOR

## 5.2 Análisis de las pérdidas energéticas de los resultados del desequilibrio de fases.

Cuando el motor tiene un desequilibrio en una de la fases de 400W, el incremento de temperatura es de 5.5°C a 18.8°C presentando problemas de tipo medio donde la acción a tomar para su reparación es programable.

Mientras que si el motor tiene un desequilibrio de 800W en una de las fases del equipo se eleva considerablemente de 30.9°C a 45.9°C donde el problema es de tipo severo y se requiere de una reparación inmediata antes que se produzcan daños graves en el equipo.

Como se observa en la figura 45.



Fuente: AUTOR

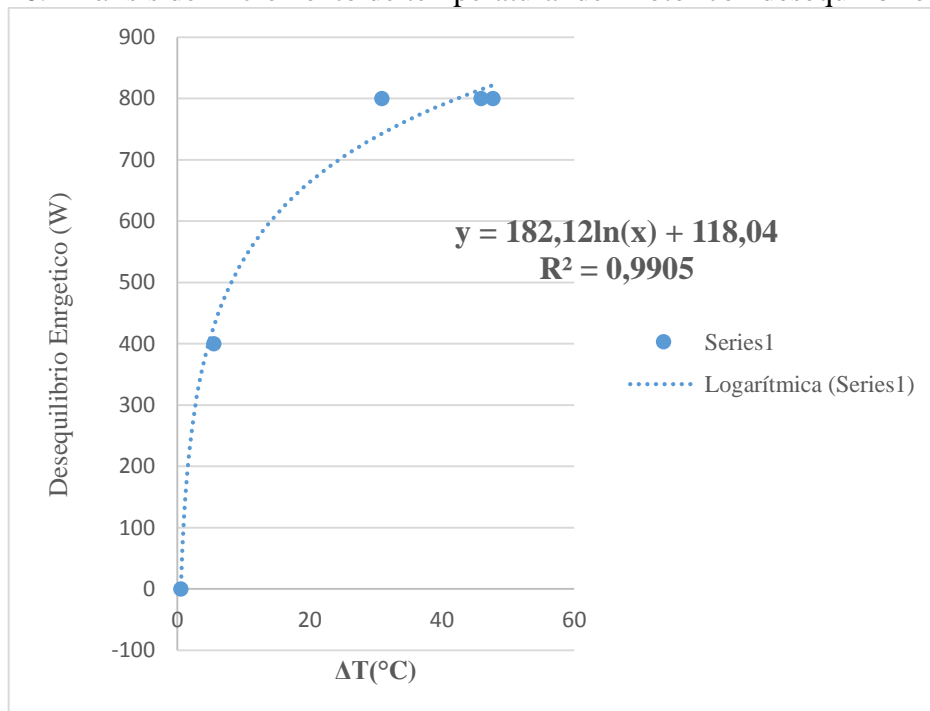
El desequilibrio de potencial se presenta desde la variación de 400W en una de las líneas de alimentación del motor en el minuto 75 incrementando el consumo de 2.20W y cuando el modo de fallo ha evolucionado a 800W en las líneas de alimentación del motor incrementando el potencial a 8,23 kW, observándose en la figura 46.

Tabla 38. Incremento del consumo energético relacionado con el incremento de temperatura modo de fallo desequilibrio de fases.

<b>Perdida energética con incremento de T</b>	
<b><math>\Delta T(^{\circ}\text{C})</math></b>	<b>Desequilibrio Energético</b>
0,5	0
5,5	400
30,9	800
45,9	800
47,7	800

Fuente: AUTOR

Figura 46. Análisis del incremento de temperatura del motor con desequilibrio de fases



Fuente: AUTOR



5.2.1 *Incremento de temperatura del motor con desequilibrio de fases.* Con los datos obtenidos de la tabla 38 de desequilibrio de fases se realizó la regresión para la determinación de la ecuación de ajuste. La regresión se refiere al cálculo de tendencia de datos utilizando represiones atreves del cálculo de método de mínimos cuadrados el R2 y sus errores. El resultado de aproximaciones de los datos de desequilibrio de fases que se aproxima a la curva más probable y la ecuación de comportamiento de la misma.

Donde  $n= 5$

$n$ = número de datos para la regresión.

$$B = \frac{n(\sum XY^I) - (\sum X)(\sum Y^I)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} .$$

$$A^I = \bar{Y}^I - B\bar{X}$$

Tabla 39. Regresión modelo logarítmico

<b>Modelo logarítmico</b>				
<b>Xi</b>	<b>Yi</b>	<b>X'=lnX</b>	<b>X'Yi</b>	<b>X'^2</b>
0,50	0,00	-0,69	0,00	0,48

Tabla 39. (Continuación)

5,50	400,00	1,70	681,90	2,91
30,90	800,00	3,43	2744,60	11,77
45,90	800,00	3,83	3061,17	14,64
47,70	800,00	3,86	3091,95	14,94
<b><math>\sum Xi</math></b>	<b><math>\sum Yi</math></b>	<b><math>\sum X'</math></b>	<b><math>\sum X'Yi</math></b>	<b><math>\sum X'^2</math></b>
130,50	2800,00	12,13	9579,62	44,74

Fuente: AUTOR

Tabla 40. Determinación de valores

<b>b=</b>	182,12
<b>a=</b>	118,04

Fuente: AUTOR

El resultado de los datos obtenido se ajusta a la ecuación de tipo logarítmica:

$$y = a + b.lnx$$

$$y = 182,12\ln(X) + 118,04$$

Coeficiente de determinación  $R^2 = 0,9905$

El incremento de temperatura que se observa en la figura 46, demuestra claramente que a medida que incrementa la temperatura se incrementa el consumo energético, estas variaciones se reflejan finalmente en pérdidas económicas significativas para el consumidor. El punto de referencia para el análisis de falla del motor es a partir del incremento de potencia de 0,022kW provocado por el desequilibrio de las fases a 400W donde se determina un aumento de temperatura de 5,5 °C; a medida que evoluciona el fallo a 800W de desequilibrio de fases el incremento de temperatura es de 45,9 °C incrementando el consumo energético a 0,340kW. Demostrándose que mientras mayor es desequilibrio de fases mayor es el incremento de temperatura elevando el grado de falla en el motor

*5.2.2 Relación con sistema Termodinámico.* Dentro de los sistemas termodinámicos, una consecuencia de la ley de conservación de la energía es la llamada primera ley de la termodinámica.

La cual establece que, al suministrar una determinada cantidad de calor (Q) a un sistema, esta cantidad de energía será igual a la diferencia del incremento de la energía interna del sistema ( $\Delta U$ ) más el trabajo (W) efectuado por el sistema sobre sus alrededores,  $Q = \Delta U + W$ , o de otra manera.

Aunque la energía no se pierde, se degrada de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica.

Desde un punto de vista cotidiano, las máquinas y los procesos desarrollados por el hombre funcionan con un rendimiento menor al 100%, lo que se traduce en pérdidas de energía y por lo tanto también de recursos económicos o materiales.

Cuando el fallo evolucionado en el motor la energía que se pierde en el sistema se disipa

en forma de calor, esta pérdida se puede determinar mediante termografía.

5.2.3 *El costo de la energía.* La energía desaprovechada cuando existe un incremento de temperatura por la evolución del modo de fallo desequilibrio de fases en el motor trifásico asincrónico tipo jaula de ardilla se representa en la tabla 41, que permite identificar que a medida que existe un incremento de temperatura se incrementa los costos de la energía perdida en forma de calor.

Tabla 41. Costo de la energía perdida cuando existe un incremento de temperatura evolución del modo de fallo desequilibrio de fases.

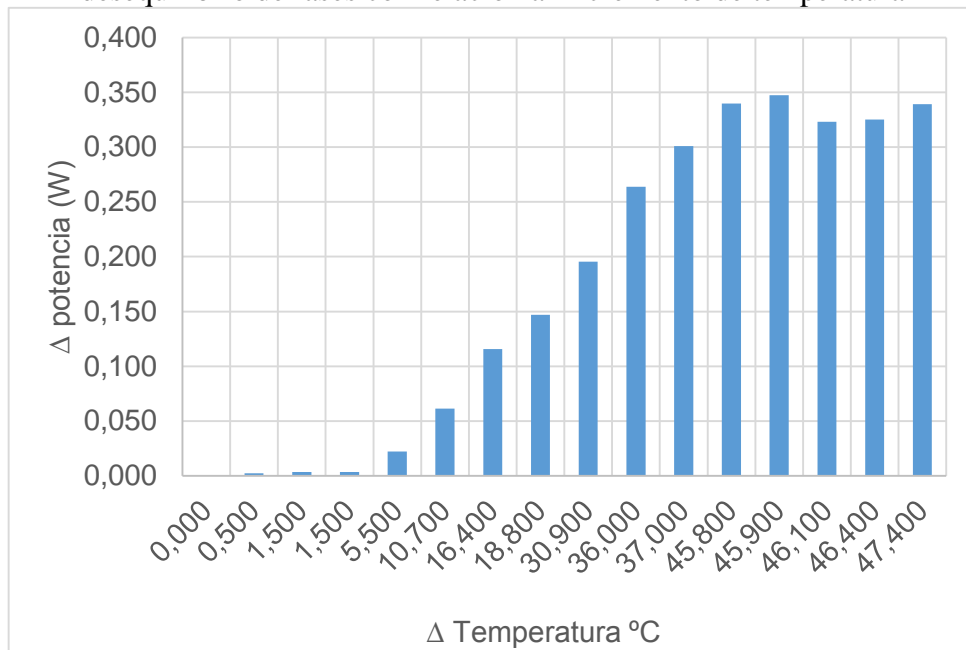
$\Delta T(^{\circ}C)$	Costos energía perdida
-	0
0,500	0,000158
1,500	0,000355
1,500	0,000459
5,500	0,003617
10,700	0,011982
16,400	0,026294
18,800	0,038211
30,900	0,057176
36,000	0,085749
37,000	0,107584

Tabla 41. (Continuación)

45,800	0,132498
45,900	0,146773
46,100	0,147069
46,400	0,158461
47,400	0,176353

Fuente: AUTOR

Figura 47. Análisis del incremento del consumo de potencia del motor con desequilibrio de fases con relación al incremento de temperatura



Fuente: AUTOR

La aplicación del método de linealización establece una ecuación potencial que es la que más se ajusta la curva que generan los datos obtenidos, del incremento de temperatura y el costo que genera este incremento por el consumo de energía que es desaprovechada cuando existe desequilibrio de fases en la alimentación a un motor trifásico jaula de ardilla.

$$y = 0.001x^{1,2207}$$

Donde:

$y$ = costo de energía perdida.

$x$ = incremento de temperatura en °C

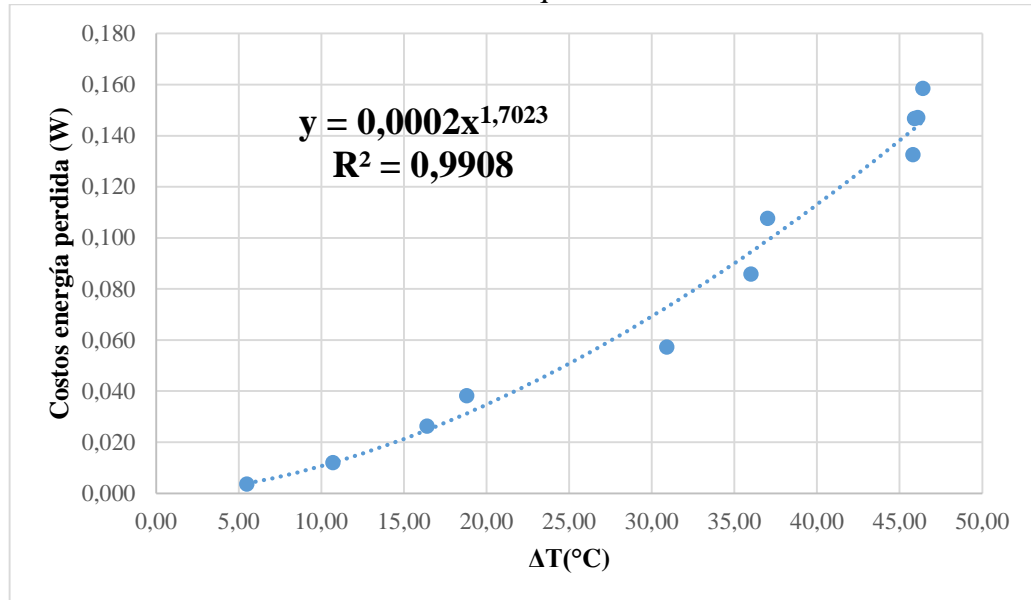
Los valores numéricos corresponden a las constantes para el cálculo.

$$R^2 = 0,9752$$

El valor de  $R^2$  cuanto más cercano sea a uno representa que los valores que se calculen con la ecuación serán más acertados.

El incremento de temperatura por desequilibrio de fases incrementa el costo de energía que es desaprovechada.

Figura 48. Costo de la energía perdida cuando existe un incremento de temperatura modo de fallo desequilibrio de fases.



Fuente: AUTOR

La tabla 43 indica el cálculo para la regresión de la ecuación potencial

5.2.4 *Regresión modelo potencial.* Con los datos obtenidos de la tabla 41 de desequilibrio de fases se realizó la regresión para la determinación de la ecuación de ajuste. La regresión se refiere al cálculo de tendencia de datos utilizando regresiones a través del cálculo de método de mínimos cuadrados el  $R^2$  y sus errores.

Tabla 42. Regresión modelo potencial Datos

Modelo potencial		$y=ax^b$		n=11	
$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	Costo de energía Perdida				
$X_i$	$Y_i$	$X'=\text{Log}Y_i$	$Y'=\text{Log}Y_i^2$	$X_iY_i$	$X'^2$
5,50	0,004	0,74	-2,44	-1,80770766	0,54813691

Tabla 42. (Continuación)

10,70	0,012	1,03	-1,92	-1,97793075	1,05963096
16,40	0,026	1,21	-1,58	-1,91962742	1,47584558
18,80	0,038	1,27	-1,42	-1,80651577	1,62347822

30,90	0,057	1,49	-1,24	-1,85169988	2,21997627
36,00	0,086	1,56	-1,07	-1,66021828	2,42207747
37,00	0,108	1,57	-0,97	-1,51841495	2,45925665
45,80	0,132	1,66	-0,88	-1,45789223	2,75847414
45,90	0,147	1,66	-0,83	-1,38487796	2,7616214
46,10	0,147	1,66	-0,83	-1,38499585	2,76790077
46,40	0,158	1,67	-0,80	-1,33334372	2,77728218
$\sum X_i$	$\sum Y_i$	$\sum X'^2$	$\sum Y'^2$	$\sum X_i Y_i$	$\sum X'^2$
339,50	0,92	15,53	-13,98	-18,10	22,87

Fuente: AUTOR

Determinamos los valores de A y B mediante la utilización de las formulas

$$B = \frac{n(\sum XY') - (\sum X)(\sum Y')}{n \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

$$A' = \bar{Y}' - B\bar{X}$$

Tabla 43. Regresión modelo potencial

1,702266758	<b>B</b>
-3,673833182	<b>A</b>
a=	2E-04

Fuente: AUTOR

La ecuación responde al modelo potencial  $y = 0.0002x^{1.7023}$

Tabla 44. Calculo del costo de la energía perdida modo de fallo desequilibrio de fases.

<b>Tiempo(min)</b>	<b>Tiempo h</b>	<b>Potencia</b>	<b><math>\Delta</math> Potencia</b>	<b><math>\Delta</math> Consumo Energético</b>	<b>Costos energía perdida (\$)</b>
15	0,25	2,179	0,000	0	0
30	0,5	2,181	0,002	0,001212	0,000158
45	0,75	2,182	0,004	0,002728	0,000355
60	1	2,182	0,004	0,003533	0,000459

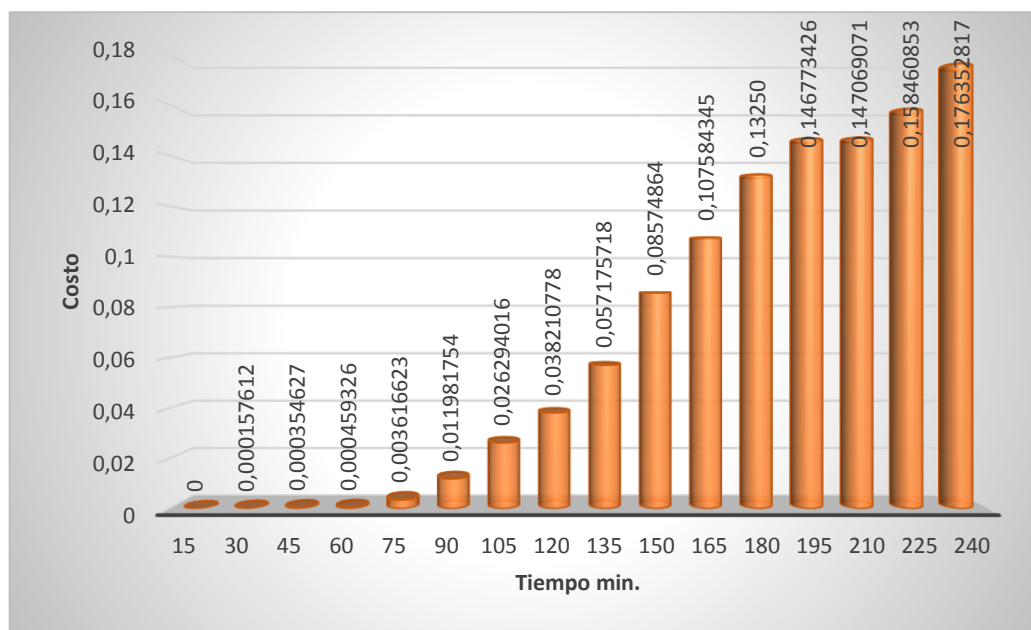
Tabla 44. (Continuación)

75	1,25	2,201	0,022	0,02782	0,003617
----	------	-------	-------	---------	----------

90	1,5	2,240	0,061	0,092167	0,011982
105	1,75	2,294	0,116	0,202262	0,026294
120	2	2,326	0,147	0,293929	0,038211
135	2,25	2,374	0,195	0,439813	0,057176
150	2,5	2,443	0,264	0,659605	0,085749
165	2,75	2,480	0,301	0,827572	0,107584
180	3	2,518	0,340	1,019213	0,13250
195	3,25	2,526	0,347	1,129026	0,146773
210	3,5	2,502	0,323	1,131301	0,147069
225	3,75	2,504	0,325	1,21893	0,158461
240	4	2,518	0,339	1,35656	0,176353
<b>Costo total</b>					<b>1,092737</b>

Fuente: AUTOR

Figura 49. Costo de la energía perdida cuando existe un incremento de temperatura modo de fallo desequilibrio de fases



Fuente: AUTOR

### 5.3 Conclusión del análisis de pérdidas energéticas de resultados obtenidos de desalineación en paralelo, desequilibrio de fases del motor 3F tipo jaula de ardilla.

El cálculo y análisis de los datos que se realizan en la tabla 35. Permiten determinar que el costo por la energía que se pierde en forma de calor es de \$ 0,422 durante las 8 horas

de funcionamiento a la cual el motor fue expuesto al modo de fallo de desalineación.

La tabla 38. Muestra un resultado del cálculo del valor de la pérdida \$ 1,092 que se genera por el fallo de desequilibrio de fases en un periodo de tiempo de 4 horas.

Se determina que el desequilibrio de fases produce un 50% más de pérdida que la desalineación en paralelo.



## **CAPÍTULO VI**

### **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **6.1 Conclusiones**

En los ensayos realizados se observó que la temperatura incrementa cuando se desarrolla un modo e fallo como en el caso del desequilibrio de fases y la desalineación en paralelo.

Para la construcción del módulo de pruebas se utilizó un sistema de desalineación el cual permito generar el modo de fallo dando lugar a la evolución de los mismos.

La utilización de la cámara termográfica en el estudio de la evolución de los modos de fallo facilita el análisis para la determinación de las perdidas energéticas que se producen por la evolución de los modos de fallo.

Los resultados obtenidos del análisis termográfico facilitaron la tabulación de datos los cuales permitieron la elaboración de un modelo matemático para determinar los intervalos de temperatura y porcentaje de pérdidas energéticas durante la evolución de los modos de fallo de desalineación en paralelo cada 30 minutos y el desequilibrio de las fases del motor cada 15 minutos comparados con las pruebas realizadas al motor sin ninguna falla.

#### **6.2 Recomendaciones**

Tener conocimiento del correcto funcionamiento de los equipos de análisis termográfico y energético antes de realizar las pruebas de diagnóstico de fallas en un motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla.

Considerar en termografía que al momento de analizar los colores claros a las altas temperaturas y los colores oscuros a las bajas temperaturas, estos son los efectos y no la causa raíz del problema de desalineación del equipo, excentricidad, o desequilibrio de fases, etc.

Los mismos que de no ser corregidos a tiempo afectaría a los rodamientos y podría doblar el eje del equipo, fallas que se detecta por análisis termográfico mediante los incrementos de la temperatura.

Evitar iluminación y otras fuentes de calor que impacten mínimamente en particular sobre superficies expuestas al exterior del motor, donde la pérdida de calor por convección puede ser importante y enmascarar el calentamiento de un elemento defectuoso.

Para el incremento de temperatura sin ningún modo de falla se debe tomar la temperatura inicial con relación a la temperatura ambiente en la que se encuentra el equipo.

En general se debe efectuar correctamente las instalaciones eléctricas y montaje del motor y su carga para evitar daños mayores en los equipos causantes de grandes pérdidas económicas.

## BIBLIOGRAFÍA

**CARDENAS, Eduardo.** *El motor asincrono trifasico, generalidades y ofertas de la abb para la coordinación de las protecciones.* [En línea]. España, 2013 [Consulta: 04 de octubre\_de\_2016.]. Disponible: [https://library.e.abb.com/public/477b5b9a47443becc125791a003ab324/1TXA007106G0701\\_CT6.pdf](https://library.e.abb.com/public/477b5b9a47443becc125791a003ab324/1TXA007106G0701_CT6.pdf).

**BARUCH, Alexandra.** *Diagnostico de fallas en motores eléctricos de inducción trifásicos tipo jaula de ardilla usando redes neuronales artificiales.* [En línea]. México, 2013.[Consulta:03\_de\_octubre\_de\_2015.]. Disponible: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/33849/1/baruchveraalexandra.pdf>.

**BETHEL, Noah.** *Powerful Motor Management from PDMA, analisis por Zona de Falla.* [En línea]. España, 2015. [Consulta: 09 de Noviembre de 2016.]. Disponible en: [http://www.pdma.com/pdfs/Articles/Analisis\\_de\\_Zonas\\_de\\_Falla.pdf](http://www.pdma.com/pdfs/Articles/Analisis_de_Zonas_de_Falla.pdf).

**CARDENAS, Ruben Dario.** *Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las intensidades eléctricas.* Barcelo-España: ABB, 2010, pp 43-45.

**CASTILLO, Joseph.** *Mantenimiento industrial, termografía.* [En línea]. España, 2010. [Consulta:\_18\_de\_Julio\_de\_2015.]. Disponible\_en: <http://www.monografias.com/trabajos92/termografia-mantenimiento/termografia-mantenimiento.shtml>.

**CENTRO INTEGRADO DE FORMACION PROFESIONA (CIFP).** *Introducción a los sistemas trifasicos. centro integrado de formación profesional área de sistemas electroténicos y automáticos.* [En línea]. Massachuset, 2013. [Consultado: 01 de agosto de\_2015.].\_Disponible\_en: [http://www.cifp\\_mantenimiento.es.learning/index.php?id=2&id\\_sec=1](http://www.cifp_mantenimiento.es.learning/index.php?id=2&id_sec=1).

**ENRIQUEZ, Harper.** *ABC de las instalaciones eléctricas.* México-Guatemala: Hall, 2013, pp. 56-61.

**BATISTA, César.** *Diagnóstico Técnico de Maquinas Rotativas.* Segunda edición. Cuba-La Habana: Holguín, 2005, pp. 46-54

**CREAU, Anthony.** *Instrumentación Industrial.* Octava Edición. México-Guatemala: Alfaomega Grupo Editor, 2010. pp. 792-795.

**FLIR.** *Guía de termografía para mantenimiento predictivo.* España-Barcelona : FLIR, 2011, pp. 93-95.

**HERNÁNDEZ, Manuel.** *Eficiencia energética.* [En línea]. España, 2013. [Consulta: 18 de julio de 2015.]. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos67/eficiencia-energetica/eficiencia-energetica2.shtml#ixzz3gNXW8q49>.

**JIMENEZ, Juan.** *Maquinas eléctricas.* [En línea] Croacia,2011. [Consultado: 03 de agosto\_de\_2015.].\_Disponible\_en: <http://www.ie.itcr.ac.cr/juanjimenez/cursos/potencia%20diplomado/motores.pdf>.

**MEJÍA, Jorge.** *Análisis de vibraciones en motores eléctricos asíncronos trifásicos .* [En línea].\_España,\_2009.[Consulta:\_03\_de\_agosto\_de\_2015.].\_Disponible\_en: [http://www.monografias.com/trabajos67/eficiencia\\_energetica/eficiencia.energetica2.shtml#ixzz3gNXW8q49](http://www.monografias.com/trabajos67/eficiencia_energetica/eficiencia.energetica2.shtml#ixzz3gNXW8q49).

**VANDELVIRA, Andrés.** *Motores de corriente alterna.* Barcelona-España: Masson, 2011, pp. 20-25.

**BARCÓN, Saul.** *Calidad de la Energía. Factor de potencia y filtrado de armónicas.* México-Guatemala: McGRAW-HILL, 2012, pp. 97-99.

**GUNTER, Gilbert.** *Instalaciones Eléctricas: abastecimiento y distribución de energía.* Berlín-Munich: Siemens-Aktiengesellschaft, 1989, pp80-91.

